

## ポータラジオ勤務者の心拍変動(HRV)分析に基づく 心的負荷に関する研究

著者	金 ??
学位名	修士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2020
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00001990/">http://id.nii.ac.jp/1342/00001990/</a>

修士学位論文

ポータラジヲ勤務者の心拍変動(HRV)分析に基づく  
心的負荷に関する研究

2019 年度

(2020 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

金 珉 炫

## 目 次

第1章 序説.....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 日本のポータラジオと船舶情報オペレーター.....	1
1.3 本研究の目的 .....	1
第2章 心的負荷.....	2
2.1 ストレス .....	2
2.2 業務ストレス .....	2
2.3 メンタルワークロード(心的負荷) .....	3
2.4 ISO(国際標準化機構)の原則における心的負荷.....	3
2.5 ストレスと疲労 .....	5
2.6 心的負荷の発生構造 .....	6
2.6.1 神経系の構造.....	6
2.6.2 信号伝達システム .....	9
2.6.3 心拍変動(HRV).....	13
2.6.4 RRI .....	13
2.6.5 時系列分析 .....	18
2.6.6 周波数系列分析 .....	18
2.7 結語.....	20
第3章 交代勤務耐性 .....	22
3.1 交代勤務の特徴 .....	22
3.2 ポリヴェーガル理論(多重迷走神経理論) .....	22
3.3 耐性.....	27
3.4 結語.....	28
第4章 心的負荷の測定変数 .....	29
4.1 LF と HF .....	29
4.2 TP.....	30
4.3 CCVTP.....	30
4.4 CCVHF.....	30
4.5 LFnu と HFnu .....	30
4.6 lnLF と lnHF.....	31
4.7 SDNN.....	31
4.8 CVRR.....	31
4.9 pNN50 .....	32
4.10 r-MSSD.....	32
4.11 結語.....	32

第5章 心的負荷の測定.....	35
5.1 環境と条件.....	35
5.2 測定対象者.....	36
5.3 測定方法.....	37
5.3.1 機器.....	37
5.3.2 アンケート.....	38
5.4 導き出されたデータ.....	39
5.5 結語.....	42
第6章 分析.....	43
6.1 各オペレーターの生体データの平均.....	43
6.2 各時間帯別のストレスや疲労度.....	45
6.3 各業務別のストレスや疲労度.....	45
6.4 出勤から退勤までのストレスと疲労の変動.....	46
6.5 集中勤務時間帯の状態結果.....	57
6.6 特定業務別の心拍数とストレス.....	58
6.7 SNS 数値が 20 以上の急激に上昇した場合.....	59
6.8 心拍数が 100 以上の急激に上昇した場合.....	60
6.9 対象者のアンケート分析.....	61
6.10 交代勤務耐性に関する分析.....	63
6.10.1 1 番オペレーター.....	63
6.10.2 2 番オペレーター.....	68
6.10.3 3 番オペレーター.....	72
6.10.4 4 番オペレーター.....	76
6.10.5 5 番オペレーター.....	80
6.10.6 6 番オペレーター.....	84
6.10.7 7 番オペレーター.....	88
6.10.8 8 番オペレーター.....	92
6.11 時系列と周波数系列データの比較によるデータの信頼性分析.....	95
6.12 結語.....	99
第7章 結論.....	101
7.1 本論文で得られた主要な結論.....	101
7.2 提言.....	104
謝辞.....	106
引用・参考文献.....	107

# 第 1 章 序説

## 1.1 研究背景

韓国の海洋警察として沿岸 VTS(Vessel Traffic Service)で 3 年間勤務した筆者は、日本の港湾 VTS の役割を担っているポトラジオに関心を持っていた。長期間の交代勤務で生体リズムの変化を経験した筆者は、交代勤務による人体の影響に関する研究が交代勤務体制の改善に役立ち得ると考え、日本のポトラジオの交代勤務特性を研究テーマとすることとした。

測定は東洋信号通信社(TST Corporation)の協力を得て、ポトラジオの中で 1 箇所を選択して同じ場所に勤務している 8 人の船舶情報オペレーターを測定し、心拍変動の測定の方法では Bluetooth で連結される小型無線測定機器を利用した。

## 1.2 日本のポトラジオと船舶情報オペレーター

日本主要港湾の商船出入港管理は二つの組織で運営されている。1 つは海上保安庁が運営する海上交通センター(MARTIS, Marine Traffic Information Service)と、もう一つは民間企業である TST が運営するポトラジオ(Port Radio)がある。

東洋信号通信社は民間企業だが、地方自治体からポトラジオ(海岸局)業務を委託されて運営している。日本の全国の主要港で 24 時間 365 日休まず運営されており、船舶情報オペレーターはシフト制勤務をしている。船舶情報オペレーターの主要業務は、港務通信、動静把握、情報収集等である。オペレーターの業務は一般的な事務仕事とは異なり、出入港する船舶動向によって変化するため、業務パターンが一定でなく休憩時間や交代時間が守られない場合もある。

## 1.3 本研究の目的

本研究の目的は 24 時間交代勤務をしている日本のポトラジオのオペレーターらの精神的、身体的状態に関するアンケート、心的負荷と関連された心拍変動(Heart Rate Variability, HRV)などの生体情報を測定し、精神的作業負荷(Mental Work Load)の観点でオペレーターらの特性を分析し、オペレーターたちの交代勤務耐性の程度を比較するとともに、交代勤務耐性に有用な要因を導き出すことである。

## 第2章 心的負荷

第2章では、交代勤務耐性を測定するための前提となる心的負荷について考察する。心的負荷はストレスと疲労を含むメンタルワークロード(Mental workload, MWL)の概念であり、相互間の違いが明確でないストレスと疲労はISO(国際標準化機構)の原則を基準に区別する。

また、ストレス反応が発生する解剖学的な構造について調べ、各種のストレス反応と順序についても考察する。そして、本研究で測定した生体情報は心臓の拍動に関連するものなので、心臓でのストレス反応についても考察し、どのような原理で心臓の拍動でストレスを測定するかについても調べる。

### 2.1 ストレス

最初のストレスの概念は1936年7月4日 Hans Selye が Nature 誌に発表した「A syndrome produced by diverse nocuous agents<sup>(1)</sup>」という論文からだった。Selye は「外界からのあらゆる要求に対する生体の非特異的な反応」をストレスと定義した。ストレスは身体が外部の刺激を受けて緊張状態が発生した時、これに適応するために発生する身体内部の非特異的な反応だと言える。すなわち、ストレスは因子ではなく生体状態である。しかも、生体にとって有害な環境因子だけでなく、よい環境因子も「ストレッサー」に含まれる。Selye はストレスを起こす生体に加えられる外部からの刺激、環境因子を「ストレッサー」と表現した。物理的ストレッサー、化学的ストレッサー、生物学的ストレッサー、精神的ストレッサーに分けられるが、最近特に問題になっているのは精神的ストレッサーである<sup>(2)</sup>。

人間の場合、戦闘、性的虐待、そして他の種類の極端的な暴力にさらされると、心的外傷後ストレス障害(Post Traumatic Stress Disorder, PTSD)につながりかねず、不安、記憶障害、そして傷害の症状が現われることもある<sup>(3)</sup>。

### 2.2 業務ストレス

欧州委員会(European Commission)の雇用・社会問題・インクルージョン総局(Employment, Social Affairs and Inclusion, EMPL)で発行した「Guidance on work-related stress, 1999」によれば、業務ストレス(work-related)は、業務環境と業務組織、業務の嫌悪や有害な面に対する情緒的、認知的、行動的、生理的反応であり、高いレベルの覚醒と苦痛、あるいはしばしば状況に対処ができないような無力な感情から定義される。

なお、このガイダンスによると、交代勤務では人間本然の生物学的変化に相応する環境的ニーズが一致しないという。また交代勤務中で最も否定的な勤務形態は不規則な交代勤務であるとしており、ヨーロッパでは VDT(Video display terminals)関連業務を一日中遂行する場合にもストレスが溜まるという<sup>(4)</sup>。

## 2.3 メンタルワークロード(心的負荷)

過去と違い、現代の社会は筋力を使う肉体的労働よりは、機械やコンピューターを利用した労働が増えている。このような労働は、過去の肉体的労働よりも身体的負担が少ない姿勢で仕事をする。そして、精神的な作業に比重を置いており、それによって移動が少なく、限られた場所で勤務を続けるという特性がある。したがって、過去に身体様々な部位に現れた身体的な疲労よりは、精神的に緊張する業務に根ざした精神的な疲労やストレスが、より多くの労働者たちに業務負担に影響を与える要因となっている。精神的負担は長時間の緊張や単調な作業が続く環境で発生するもので、勤務者が受ける精神的な負担が大きく、ヒューマンエラーの要因ともなる。このような精神的な業務負担をメンタルワークロード(Mental workload, MWL)と呼び、ISO(国際標準化機構)でもこれに関する規格作りが検討されている<sup>(5)</sup>。Gudipati & Pennathur は Workload を「業務や複合的な業務に関連する身体的、精神的要求」と定義した<sup>(6)</sup>。

本研究ではメンタルワークロードを心的負荷として解析し分析した。心臓拍動の周波数系列分析の結果、高周波数(HF)数値に対する低周波数(LF)数値の割合を示す LF/HF の数値は概ね交感神経の活動を示す。そのために Kobayashi と Senda(1998)が定義したメンタルワークロードの分析で LF/HF の数値は交感神経(SNS)の指標として考慮される<sup>(6)</sup>。

## 2.4 ISO(国際標準化機構)の原則における心的負荷

ISO(国際標準化機構)の心的負荷に関する具体的な内容を見てみると、ISO 6385「作業システム設計のための人間工学の原則(Ergonomics principles in the design of work systems)」では、業務ストレス(Work stress)は外部的業務負担(External workload)として「業務システムにおける人間の生理的・心理的な内部的負担(Internal load)に影響を与える外的条件や要求」であり、これとは区別して、業務負担(Work strain)を内部的負担(Internal load)として「個人の特性によって外部的業務負担(External workload)にさらされる勤務者の内部反応」と定義されている。

業務疲労(Work fatigue)は「休憩を取ることで完全に回復が可能な業務負担(Work strain)による非病理的な損傷」で、精神的(Mental)や肉体的(Physical)、部分的(Local)か一般的(General)でありと規定されている。

ISO 26800「人間工学—一般的な使い方、原則と概念(Ergonomics-General approach, principles and concepts)」にはそれと似た概念で業務ストレス(Work stress)を外部的負担(External load)と規定し、これは内部的負担(Internal load)とともに中立的な意味として肯定的(Positive)、中立的(Neutral)、否定的(Negative)影響を与えることがすべて可能だと規定されている。まだ、ISO 6385の業務システム(Work system)ではISO 26800の一般のシステム(System)の外部的負担(External load)を外部的業務負担(External workload)と規定されている。また、ISO 26800では、疲労(Fatigue)を「休憩を取ることで完全に回復が可能な内部的負担(Internal load)による非病理的な損傷」であり、精神的(Mental)、肉体的(Physical)、部分的(Local)か一般的(General)であり得ると規定されている。

ISO 6385の追加規格として WG2(精神作業)で ISO 10075「精神的作業負担に関する人間工学

の原則(Ergonomic principles related to mental work-load)」における精神的ストレス(Mental stress)は「外部から人間に対して作用を及ぼし、かつ、精神的に効果を与える評価可能な影響の全体<sup>(7)</sup>。」と定義した。精神的ストレス(Mental stress)はISO 6385の業務負荷負荷(Work stress)と互換される意味として外部的な業務負荷(External workload)と同じ意味である。精神的負担(Mental strain)は、「現状における個人の精神的ストレス(Mental stress)からの即刻の影響」と定義された。ここでの精神的ストレスと精神的負担は結果的な意味として、一般的な意味での精神的ストレスや精神的負担とは異なる。ISO原則でのストレスは外部から受ける刺激そのものであり、負担(Strain)はそのようなストレスに対応した身体内部的な反応であり、疲労はそのような負担によって生じた損傷であることがわかる。

ISO 10075では精神的負担の結果(Consequences of mental strain)も記述されているが、本研究と関連した部分を解釈して引用した。

(1) 短期露出による促進効果(Facilitating effects resulting from short-term exposure)

① ウォーミングアップ効果(Warming-up effect)

ある活動を始めたすぐ後に、当初に要した努力に比べて、その活動を行うために必要な努力が少なくてすむようになるような、精神的負担によって普通に起こる影響<sup>(7)</sup>である。

② 活性化(Activation)

精神的及び身体的機能の効率に差がある内部状態である。精神的負担は、その持続期間と強さとによって、活性化の程度に違いを起こす。活性化が最適であるような領域が存在する。

すなわち、低くも高くもなく、機能の最高の効率が保証される領域がある。あまり急激な負担の増大は、好ましくない過剰な活性化をもたらすことを留意することが望ましい<sup>(7)</sup>。

③ 学習(Learning)

業務経験をもとに計画、態度及び価値のような行動可能性、または行動潜在力の持続的な変化を誘導するプロセスである。

(2) 長期露出や繰り返し露出による促進効果(Facilitating effects resulting from long-term or repeated exposure)

① 練習効果(Practice effect)

精神的負担に繰り返し対処した後、学習の過程に伴って生じた、個人の遂行能力の持続的な変化<sup>(7)</sup>。

② 力量開発(Competence development)

作業に積極的に参加する等の結果に係る習得、統合の強化や認知的、情緒的、社会的運動習熟と能力の差別化である。力量開発は方法論または社会的側面のように互いに異なる側面を持つことができ、精神的ストレスにさらされることに備える長期的な効果を促進することである。



### (3) 短期露出による損傷効果(Impairing effects resulting from short-term exposure)

#### ① 精神疲労(Mental fatigue)

先行する精神的負担の強さ、持続期間及び時間的パターンに依存する精神的及び身体的機能の効率の一時的な減退である。精神疲労の回復は、活動の変化よりもむしろ回復作用によって達成される。この機能の効率の低下は、例えば、疲労感、努力の割に成果が上がらない、過誤の種類・発生頻度などによって明らかになる。この減退の程度は、個人の事前の状態によっても決まる<sup>(7)</sup>。

#### ② 疲労様状態(Fatigue-like states)

状況がほとんど変化しないために生じる精神的負担の影響を受けている個人の状態。この状態は、課業及び又は環境・状況が変わればすぐに消失する。この状態には、単調感、注意力の低下及び心的飽和がある。

精神疲労と同様に疲労感も、通常、疲労様状態でも生じる。しかし、疲労様状態は、一時的であるという点で、精神疲労とは異なる。このような疲労様状態には、特に著しい個人差がみられる<sup>(7)</sup>。

##### ◎ 単調感(Monotony)

長時間の、単一の、繰り返しの課業又は活動の間に起こりやすい、活性化の減退がゆっくり進行する状態であり、主として、眠気、疲労感、遂行能力の低下及び変動、適応能力及び責任感の低下、並びに心拍変動の増加を伴うもの<sup>(7)</sup>。

##### ◎ 注意力の低下(Reduced vigilance)

ほとんど変化がない監視業務で、(例えば、レーダスクリーン又は計器盤の監視中に)発見の能力がゆっくり低下していく状態。単調感と注意力の低下との違いは、原因となる環境による違いであり、影響の違いではない<sup>(7)</sup>。

##### ◎ 心的飽和(Mental satiation)

反復的な課業又は状況に対し神経的に不安定になって、強い感情的な拒否を示す状態であり、経験的には、はかどらない又はうまくいかないというような状態。心的飽和のこのほかの症状として、怒り、遂行能力の低下、及び／又は疲労感、並びに逃避傾向がある。単調感及び注意力の低下とは対照的に、心的飽和の場合には、活性化の水準は変化しないか、又はかえって上昇し、否定的な感情が伴う<sup>(7)</sup>。

## 2.5 ストレスと疲労

ISO(国際標準化機構)の原則によると、ストレスは外部環境の要求による負荷であり、一般的な意味として使われるストレスはストウレイン(Strain)、すなわち負担である。そして疲労はこれらの負担から発生する休息でのみ回復が可能な損失と解釈することが可能であった。すなわ

ち、ストレスは外部的環境と要求に対応した身体の反応としてストレッサーに向き合う瞬間の即時反応であり、業務遂行中も業務内容や環境の変化などが生じれば消えたり軽減されたりとむしろ肯定的な影響を与えるストレスも存在するが、疲労はストレスの否定的な影響の結果として生じた損傷そのものを意味して休憩を取らなければ回復しない。

Ross Owen Phillips の論文(2014)では疲労を定義するにあたって生理的(Physiological)、遂行的(Performance)知覚的(Perceptual)な側面の3種類がますます受け入れられているという。

また、ストレスは人とその人の環境の間の関係の結果として、もし疲労が持続的業務遂行、勤務者の資源枯渇による業務完遂に対する脅威であるとするならば、図 2.1 に見られるように勤務者が自らの体力や対処能力といった資源が環境の要求を満たすのに足りないと判断されると直ちにストレスが発生しかねないという<sup>(8)</sup>。

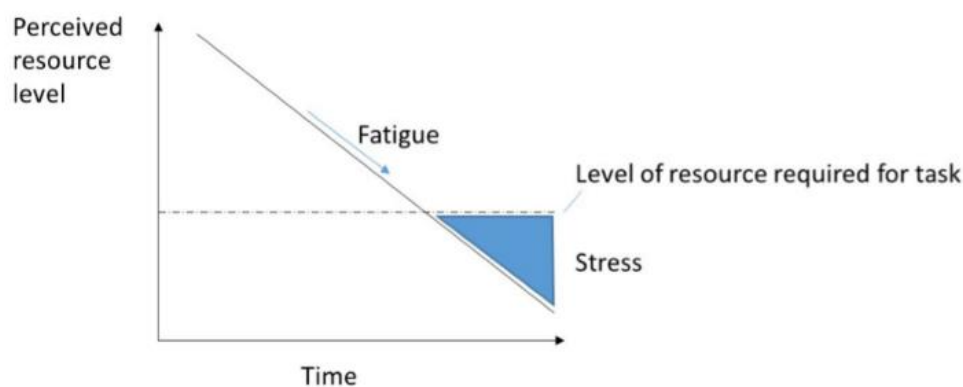


図 2.1 疲労とストレスの関係<sup>(8)</sup>

しかし、実際はストレスと疲労とは区別し難い概念である。相互間の因果関係の原因が重なる部分が多く、互いに影響を取り交わしているからである。

そのため、いまだにストレスの明確な概念や疲労とストレスの正確な区分はなされていない<sup>(4)(8)</sup>。したがって、本研究では前述の ISO 原則でストレスと疲労の概念に区分し、オペレーターのデータを解析した。

## 2.6 心的負荷の発生構造

### 2.6.1 神経系の構造

図 2.2 に示すように人体の神経系は、脳(Brain)と脊髄(Spinal cord)で構成されている中枢神経系(Central Nervous System, CNS)と、脳と脊髄からの神経からなる(脳神経、脊髄神経含む)末梢神経系(Peripheral Nervous System, PNS)で構成されている。

末梢神経系は感覚を感じて意識的に体を動かせる体性神経系(Somatic Nervous System, SNS)と無意識に身体を調節する自律神経系(Autonomic Nervous System, ANS)で構成される。

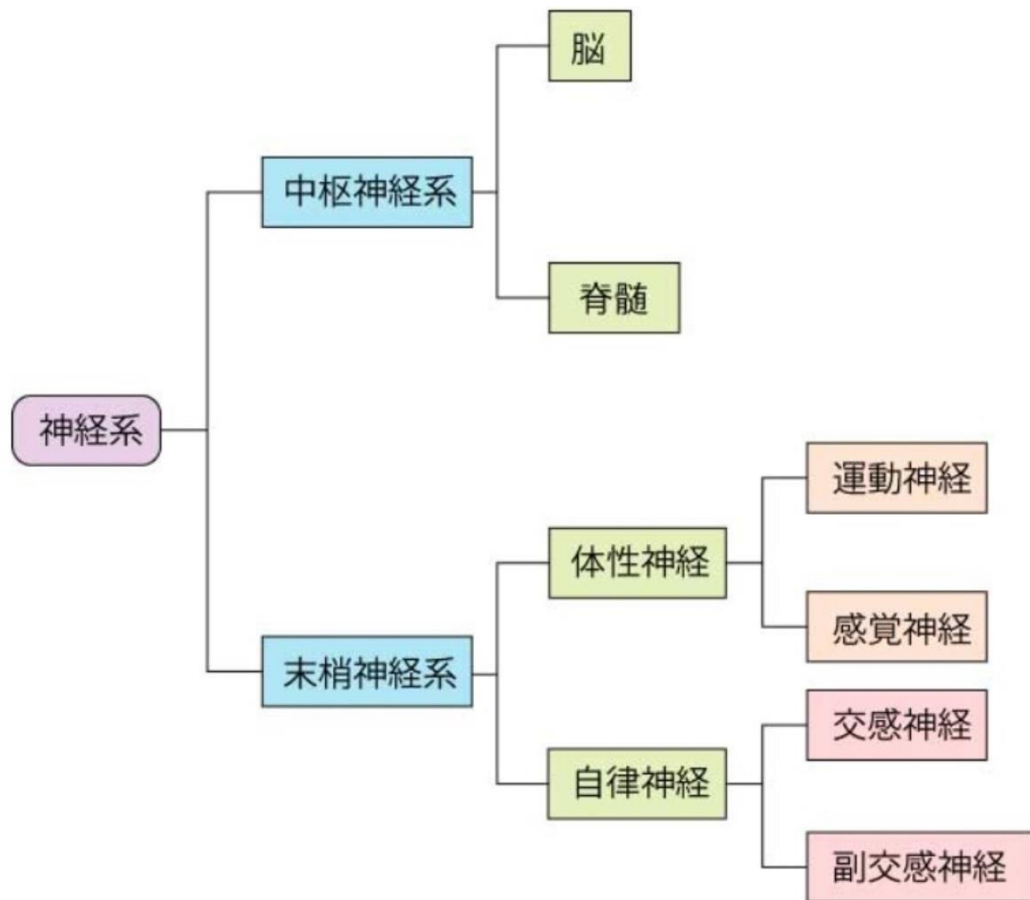


図 2.2 神経系の構造

本研究に関連するものは自律神経系であり、自律神経系は再び交感神経系(Sympathetic Nervous System)と副交感神経系(Parasympathetic Nervous System)から構成される。交感神経と副交感神経は互いに拮抗作用する。交感神経と副交感神経は生理学的に互いに逆の効果を発生させる。例えば、交感神経系は心拍動を早くする反面、副交感神経系は心拍動を遅らせる。

一般的に交感部分は身体が危険から脱出するなどストレスをたくさん受ける状態に備えるために活性化される反面、副交感部分は植物的な状態での食べ物の消化するような危険がない状態で最も活発だ<sup>(8)</sup>。

図 2.3 に示すように交感神経系は主に脊髄とつながっており、脊髄から各臓器に信号を送る神経節があり、この神経節と各臓器につながる複数の受容体が一斉に働いている。したがって、交感神経が活性化する場合、多数の臓器が同時に信号を受け、即時に変化が見られるようになる。一方、副交感神経は主に脳や延髄から当該臓器まで個別かつ直接的につながっており、神経節につながる受容体は当該臓器と非常に近いところに存在している。

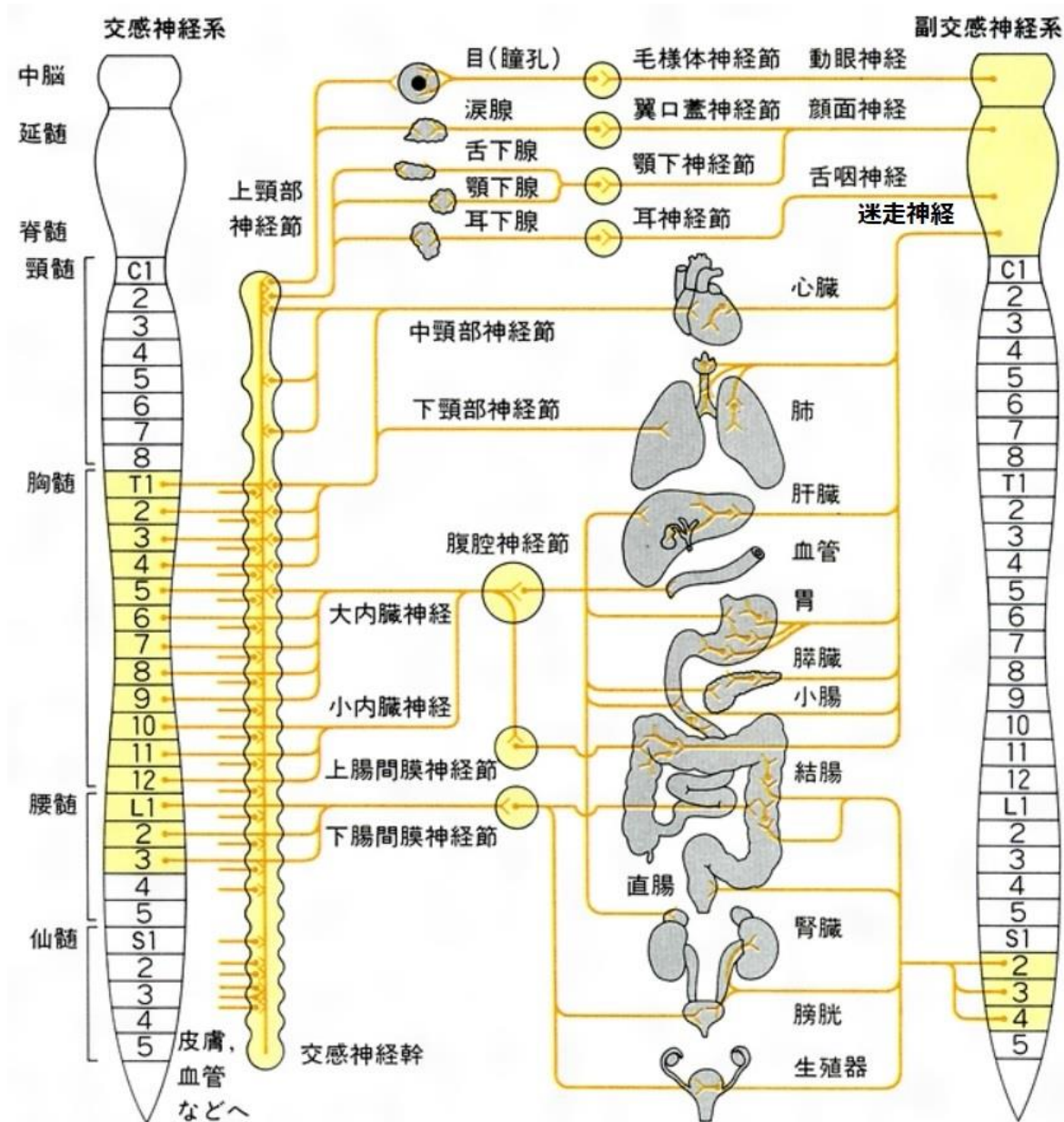


図 2.3 自律神経系(交感神経系と副交感神経系)<sup>(9)</sup>

図 2.4 に示すように脳神経の 10 番目の神経(Cranial nerve X, CN X)である迷走神経<sup>(3)</sup>は 12 組の脳神経の中で一番長くて複雑な構造を持っており、副交感神経の一つである。

また、神経節はそれぞれの臓器まで直接つながっており、受容体も臓器に近いことから、副交感神経が活性化する場合には交感神経のそれとは異なり、それぞれの臓器が個別に反応することになる。迷走神経は心臓、肺、腹部臓器の副交感的な調節に関与する<sup>(3)</sup>。



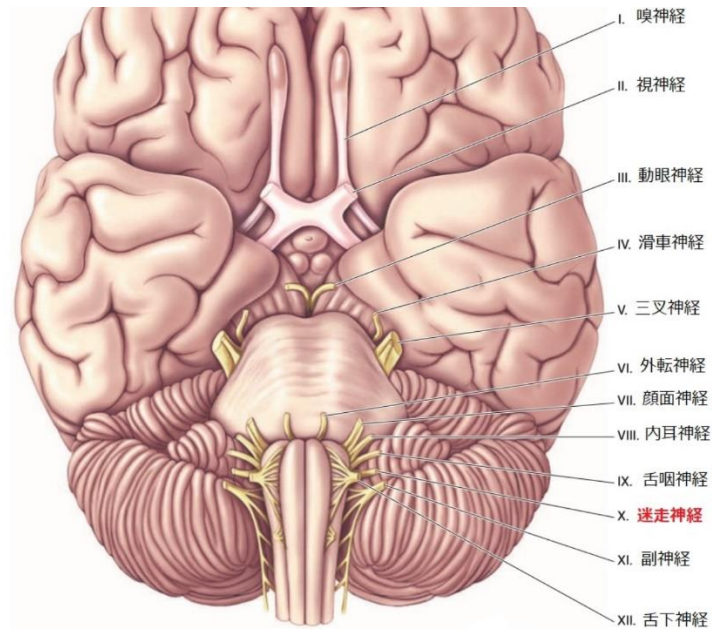


図 2.4 脳神経<sup>(3)</sup>

最近では、既存の自律神経の概念から進歩した理論が存在する。過去の自律神経は交感神経と副交感神経の2種類に分類されていたが、最近では重要性が浮き彫りになっている社会神経(Social nervous system)の概念が追加された。また、交感神経が亢進したのはストレスが高いことで副交感神経の活性化はストレスを減らすという単純な概念に対して最近では交感神経の部分の中にも正常な役割(Normal functions)をする機能も存在することも分かった。そして外部的には副交感神経が亢進したような状態に見えるが、内部的にはストレス反応が続く凍り付き反応のように副交感神経の亢進が必ずしも良い結果を意味するのではないという<sup>(10)</sup>。過去の自律神経系異常症状による治療が副交感神経活性による弛緩であったとすれば、現在は社会神経の活性化に重点を置く。また、過去にはまるでシーソーのように交感神経と副交感神経が相互に点灯する概念であったとすれば、現在は系統発生(Phylogeny)的な新たに進化することによって生じた社会神経と、進化する前の神経に段階的に区分する。

社会神経体系は、哺乳類だけが持っている最も進化した神経体系であり、闘争・逃走反応の範囲を大きく拡大させ、生存に大きなメリットを提供する。例えば、猛獣に会って戦わなければならない状況や、逃走しなければならない状況で互いに意思疎通をして群れで行動することが可能となり、チームワークを形成することで生存の確率を上げること等である<sup>(10)</sup>。本研究は主に心拍変動に関する迷走神経と社会神経に関する理論をまとめたものである。

### 2.6.2 信号伝達システム

ストレスや精神的な興奮は大腦皮質が甘受し、大腦皮質の真下にある大腦辺縁系(Limbic system, 情緒や感情に関与する神経、扁桃体と海馬が存在する部分)に影響を与える。

大腦辺縁系の下には視床下部(Hypothalamus)が存在する。自律神経は視床下部からスタート

しており、視床下部は辺縁系の信号を受けて自律神経機能を総体的にコントロールする。

視床下部の下、脳幹(Brainstem)と脳橋(Pons)に存在する青斑(Locus Coeruleus)は闘争・逃走反応(Fight-or-flight response)を誘発させる始まり点である。ストレス的な刺激を受けると、ノルエピネフリン(Norepinephrine)やノルアドレナリン(Noradrenaline)を放出させる。一般的にアドレナリン(Adrenaline)という言葉は英国式の表現で、米国ではエピネフリン(Epinephrine)と呼ぶ<sup>(3)</sup>。

腎臓の真上に位置する副腎は、副腎皮質と呼ばれる皮と、副腎髄質と呼ばれる内側部分の2つの部分で構成されている。副腎皮質はステロイドホルモンのコルチソール(Cortisol)を生成する。それが血流に放出されたら、コルチソールは蓄えられたエネルギーを使い始め、免疫系を抑制するための働きをし、生命の様々なストレスの前で私たちが進み続けられるように準備する。

事実、コルチソールを放出させる刺激は、疲労感のような生理的ストレスから恋に落ちるような情緒的刺激、もうすぐ試験に対する不安のような心理的ストレスなどが存在する<sup>(3)</sup>。このようなストレスに関わる信号伝達システムは、大きく次の2つに分類できる。

#### (1) SAM (Sympathetic-Adrenal-Medullary) axis

視床下部-交感神経-副腎髄質系の間の作用を意味する。まず、この作用の中枢調節(脳幹部)は視床下部と青斑核(Locus Coeruleus, LC)であり、活性化すると覚醒、不眠、不安が生じる。

刺激が脳の扁桃核(Amygdala)に到達すると視床下部(Hypothalamus)に信号が伝達され、交感神経系を経て副腎水質に信号が届き、アドレナリン、ノルアドレナリン(Adrenaline・Noradrenaline)が分泌され、心拍増加、気管支拡張、呼吸数増加、血圧増加などの反応を起こして危機から脱することができるのに役立つ反応を起こさせる。

主にストレスに対する即時対応が必要な闘争・逃走反応のようなものから働き、扁桃核・海馬部位を含む辺縁系のドーパミン神経系が活性化するので情緒反応(Emotion)にも関与する。

#### (2) HPA(Hypothalamic-Pituitary-Adrenal) axis

視床下部-下垂体-副腎皮質系の間の作用を意味する。視床下部で副腎皮質刺激ホルモン放出ホルモン(Corticotropin-Releasing Hormone, CRH)が分泌されれば、CRHは15秒以内に視床下部の下にある下垂体に移動、下垂体で副腎皮質刺激ホルモン(Adrenocorticotrophic Hormone, ACTH)が放出される。ACTHは腎臓の副腎(Adrenal gland)に到着し、糖質コルチコイド(Glucocorticoid、人は主にCortisol)を分泌させる。糖質コルチコイドは体全体に広がって血中の糖数値を高め、痛みの感覚を鈍化させてストレスを克服するのに役立つようにするなど、多様なストレス反応を誘発する。このような糖質コルチコイドの作用は、主に長期的なストレス状況で現れる反応である。HPA axisの機能不全は各種精神疾患を含め、心血管系、胃腸関係など広範囲に影響を与えていることが知られている。CRHと青斑は正帰環(Positive Feedback)をするので、HPA axisが活性化すれば、アドレナリン、ノルアドレナリンの分泌も促進される。CRH受容体がネズミから遺伝的に除去されれば、一般のネズミに比べて不安感のような行動が減る。このことからCRHホルモンは不安を引き起こすことが分かる。CRHの調節は辺縁系の扁桃核と海馬によっ

て調節される。前述のように扁桃体は不安と恐怖を感じる部分として CRH の分泌を促進させる。図 2.5 に示すように CRH 分泌によるコティソール(Cortisol)が過度に分泌される場合、海馬は CRH の分泌を抑制させる。PTSD や不安障害を持つ人々から海馬活動の減少が見つかる<sup>(3)</sup>。

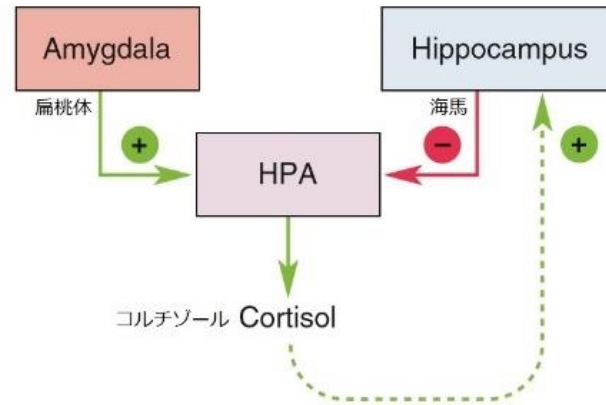


図 2.5 扁桃体と海馬による HPA 軸の Push-pull 調節<sup>(3)</sup>

CRH, ACTH 及び Cortisol は、日周期リズムにも敏感に反応するので、ストレスの一日の変動を比較すれば、その人の日周期リズムが一定かどうかを推測するのに役立つ。

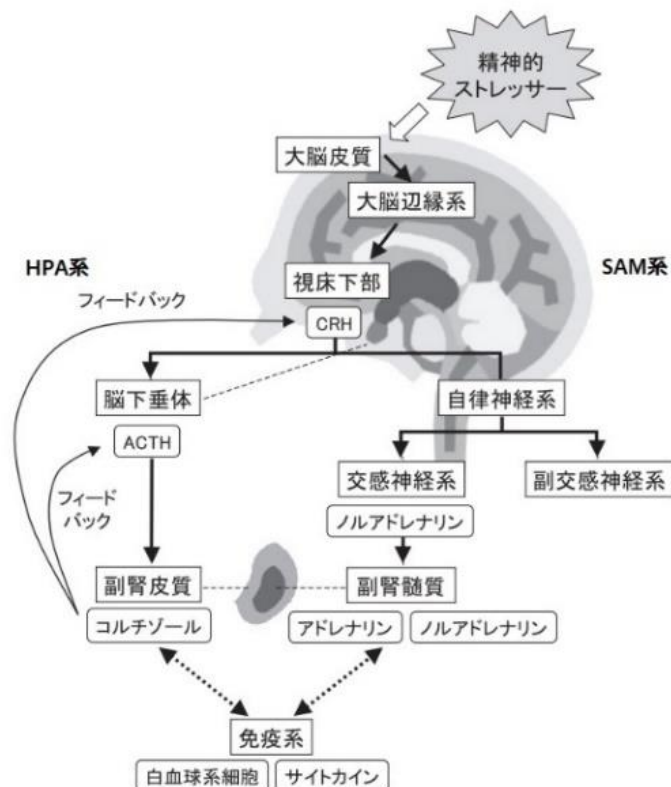


図 2.6 生体のストレス反応<sup>(11)</sup>

このようなストレス反応に対する信号伝達の結果として誘発される身体的な変化は、大きく次の二つに解釈できる。

(1) 危機の瞬間に即時回避や切り返すなどの行動的な反応で、交感神経が優位な状態である。情動性自律反応(心拍増加、血圧上昇、骨格筋血流の増大、消化器運動および血流の減少、瞳孔散大、呼吸促進、血糖上昇等)が現れる。SAM(Sympathetic-Adrenal-Medullary) axis と関連がある。

(2) 第一とは反対にむしろ動かない受動的ストレス反応(行動抑制反応)も存在する。フリージング、すくみ行動を起こす。副交感神経が優位な状態だが、依然としてストレスを受けており、身体内部的にはストレス反応が起きている状態である。HPA(Hypothalamic-Pituitary-Adrenal) axis と関連がある。

ストレスに対する身体の適応に関しては、図 2.7 に示すように Hans Selye の一般適応症候群(General Adaptation Syndrome)が一般的な理論である。この理論は恒常性(Homeostasis)の観点から次の3段階でストレスに対する身体の適応を説明している<sup>(12)</sup>。

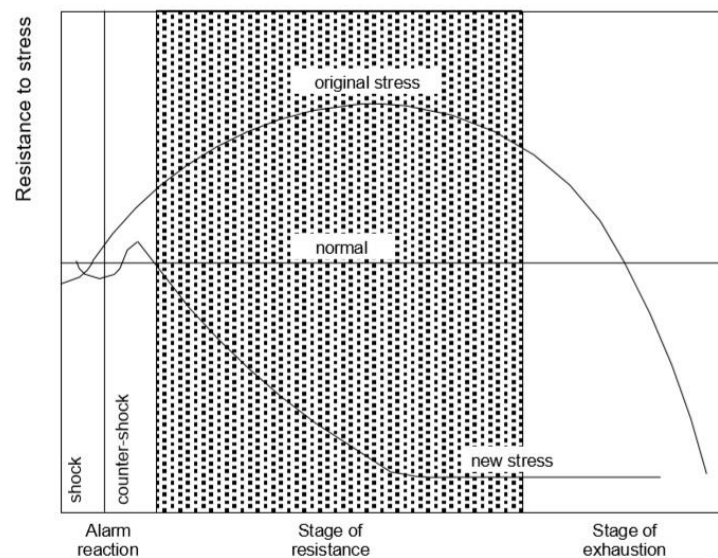


図 2.7 Hans Selye の General Adaptation Syndrome Source<sup>(13)</sup>

#### (1) 警告反応(Alarm reaction)段階

この段階はストレスを初めて発見した時に現れる。身体はストレスに対応するための準備をするようになる。SAM、HPA 系ともに活性化し、コルティソル、アドレナリン(エピネフリン)、ノルエピネフリンのようなホルモンが副腎から放出される。このような結果として血圧および血糖上昇、苦痛に鈍感になるなどストレスに対応する状態に身体を変化させる。また、CRH と青斑は正帰環(Positive Feedback)を行うため、脳幹と脳橋に存在している青斑を刺激し、ニューロンにノルエピネフリンを放出することに関与させる。



## (2) 抵抗(Resistance)段階

警告反応の段階から時間が経つと抵抗段階に突入する。身体はストレッサーが消えたり、次の段階である枯渇段階になるまでストレスに対する抵抗を続ける。ストレスに対する抵抗は身体のエネルギーと資源を消費するため、抵抗が続くほど疲れが生じて免疫力が弱くなり疾病にかかりやすくなる。この段階は心身障害(Psychosomatic disorders)がまず現われるようになる。

## (3) 枯渇(Exhaustion)段階

身体がストレッサーに対応するために使用していたホルモンなどの身体資源が完全に枯渇した状態として、不安(Anxiety)、過敏(Irritability)、責任回避、自己破壊的行動などを誘発する。

### 2.6.3 心拍変動(HRV)

心拍数(Heart Rate, HR)は 1 分当たり心臓の拍動数である。心拍変動(Heart rate variability, HRV)は 隣接する心拍数の間の変動である。これは心臓の拍動の変動性を示し、自律神経系(ANS)の作用によって発生する。外部の刺激がないか、休息を取る状態のように体を多く動かさない状態の心臓は一定な拍動数を維持するが、私たちの身体は外部の状況と身体の状態によってそれぞれ違う心拍数を必要とする。

そのような要求に応じて、必要な心拍数への変動を作り出すことは、身体の恒常性(Homeostasis)に役立つ。そのような意味で心拍変動は、身体が外部の環境と心理学的要求に適応するのを助けるための相互依存的規制システムだ。もし身体の変化によって心臓が適応できなければ、身体に無理が発生するようになる。

そのため、個人ごとに差異が存在するが、心拍変動性が空間的、視覚的に複雑であるほど望ましい状態であると言える。健康な心臓はメトロノームと違って心臓の振動が複雑で非線形的だ。こうした心臓の可撓性は身体の不確実に変化する環境に迅速に対処できる柔軟性を提供する<sup>(14)</sup>。

相対的に心拍変動が低かったり、むしろ高すぎる場合は心臓が身体の状態に対する適応力が低くなったり、疾病や異常状態であることを意味する。

本研究では、心拍変動性を慢性的なストレスと疲労に対する尺度に解釈して分析に適用した。

### 2.6.4 RRI

RRI は R-R wave Interval という意味として、心電図(ECG)のグラフ上に R 波につながる R 波の間隔としてミリ秒(ms)単位の心拍の揺れを示す。

心臓の拍動を心電図(ECG)のグラフ上に表示すると、図 2.8 のような波形で行われるが、形のでき方<sup>(15)</sup>P 波は心房の興奮を、QRS 混合波は心室の興奮を、T 波は心室の弛緩を反映している。

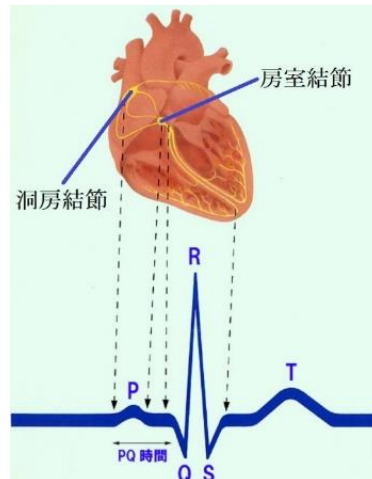


図 2.8 心電図の波

R波の振幅が最も大きいため一般的にR波を導出して1分当たり発生された個数を数えるなら心拍数を知ることができる。また、R波と続くR波の間隔(R-Rの間隔)を測定し、その間隔の差を比較・分析して心拍変動性を確認できる<sup>(16)</sup>。心拍数は普通60000でRRIを割った値で計算できる。 $(\text{Heart Rate} = 60000/\text{RRI min})$ <sup>(17)</sup><sup>(18)</sup>心拍変動性は心臓の健康度を示す。心拍数が増えれば心拍間隔が短くなり、心拍変動そのものが減少するようになる。

図2.9はWigger's Diagramである。図の最下段は心拍数の波形がElectrocardiogramで表示されており、心拍の段階による血圧など他の複数の変数の変化を示している。これで心臓の拍動は一つの独立のメカニズムではなく、多くの要素が相互に作動することを確認できる。

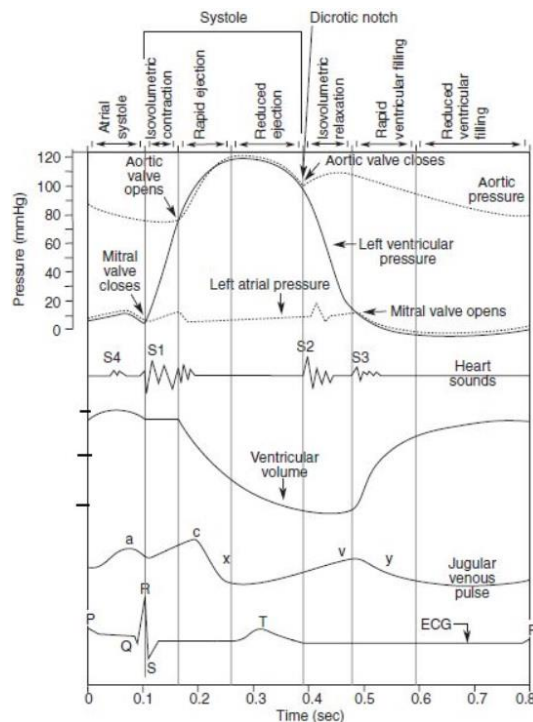


図 2.9 Wigger's Diagram of Cardiac Cycle<sup>(19)</sup>

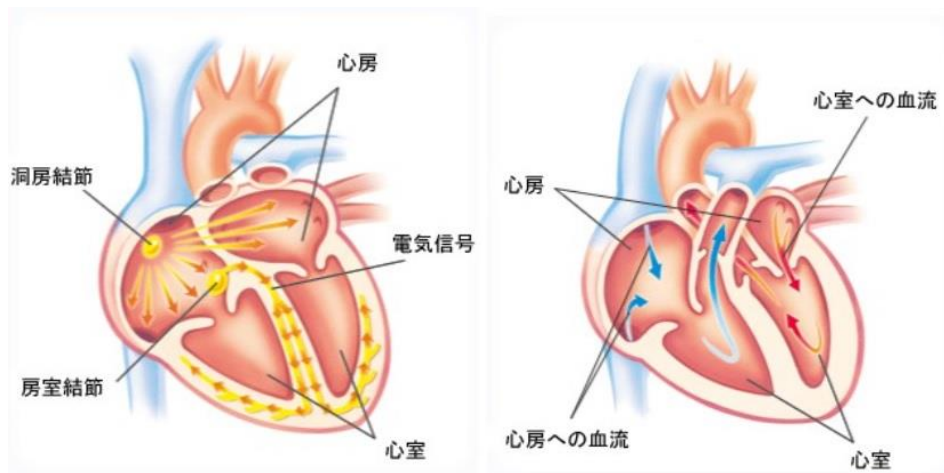


図 2.10 心臓とその刺激伝導系<sup>(20)</sup> 図 2.11 心臓とその血流<sup>(20)</sup>

前述のように心臓の拍動は心房と心室の収縮と弛緩によって行われる。心臓には交感神経と副交感神経である迷走神経の両方が分布しているが、心室にはほとんど交感神経が分布している。図 2.10 と 2.11 に示すように自律神経の信号が洞房結節に到達すると、心房全体に信号が広がって心房が収縮し、心室に血液が移動する。それと同時に房室結節で信号が伝達され、心室も収縮して血液を運べる圧力が発生する。

心臓は交感神経と副交感神経の拮抗作用で拍動が調節される。拮抗作用は生物体の現象で二つの要因相互作用しながらその効果を否定し合う作用として、心臓では交感神経と副交感神経が相互に反対の役割をする。しかし同時に作用せず、一方の作用が抑制され、もう一方に刺激を与える方式で作動する。Tae-Kyeong Lee の論文(2017)では副交感神経が優勢な休息状態で副交感神経を遮断したり、活性化させる二つの作用物質を使用した実験で、薬物の効果に対応する心拍数の変化が発見され、副交感神経を活性化したり、遮断する二つの薬物を同時に投与した場合に心拍数が 100 回周辺に一定に維持される結果が出た<sup>(21)</sup>。他の研究論文でも洞房結節 (Sinoatrial node, SA node)によって発生する基本的な心拍数は100-120 beats/minと出ている<sup>(22)</sup>。

これを内因性心拍数 (Intrinsic cardiac rate) と呼ぶが、心臓が交感神経や副交感神経に影響を受けない時の洞房結節に起因する基本的な心拍数を指す<sup>(21)</sup>。つまり、心拍数は洞房結節にある心拍調律細胞の固有な自発性に加えて自律神経系が影響を及ぼして決定される。本研究は心臓の拍動に影響を与える自律神経が洞房結節に及ぼす影響と密接な関連がある。洞房結節は心臓のペースメーカーである。息を吐くと、延髄の疑核細胞が活性化し、心拍数は減少する。逆に息を吸うと疑核に対する抑制信号を触発し、結果的に迷走神経が刺激されない状態にとどまらせて心拍数を高めることになる。このような現象は心電図を記録する時、呼吸と同期化して現れる R-R 間隔の微細な変化を通じて確認できる。R-R 間隔は息を吸う時(心拍数が増えるとき)減り、息を吐く時(心拍数が減少するとき)に増加する。すなわち、呼吸は RRI の変化を誘導する<sup>(23)</sup>。しかし、RRI が呼吸の変化を誘導するわけではない。心拍数の呼吸の増加は、複数

の臓器が連動して動く交感神経が調節されるが、心拍数の減少は副交感神経の個別な調節によって起こり、心拍数の増加もまた副交感神経の個別の抑制によっても起こるからである。それで普通、呼吸は RRI の変化を誘導するが、呼吸と心拍の間隔は独立的に変化することもある<sup>(23)</sup>。図 2.12 に示すように心臓は交感神経と副交感神経である迷走神経がつながっている。

交感神経は脊髄を通じて神経節(Ganglion)とつながり、心臓までつながる節後神経が長い。しかし、迷走神経の場合は脊髄を経ず、すぐ心臓とつながり、シナプスも心臓と非常に近いので、節後神経が非常に短い。このことから、迷走神経の信号が交感神経の信号より心臓により直接的かつ迅速に伝わると推測できる。

心拍数は普通、延髄(Medulla oblongata)にある呼吸中枢の統制を受ける。呼吸中枢の一つである疑核(Nucleus ambiguus)は、迷走神経を通じて心臓に行く副交感神経信号の入力を増加させる。迷走神経は、洞房結節の発火率を減少させ心拍数を減少させる。

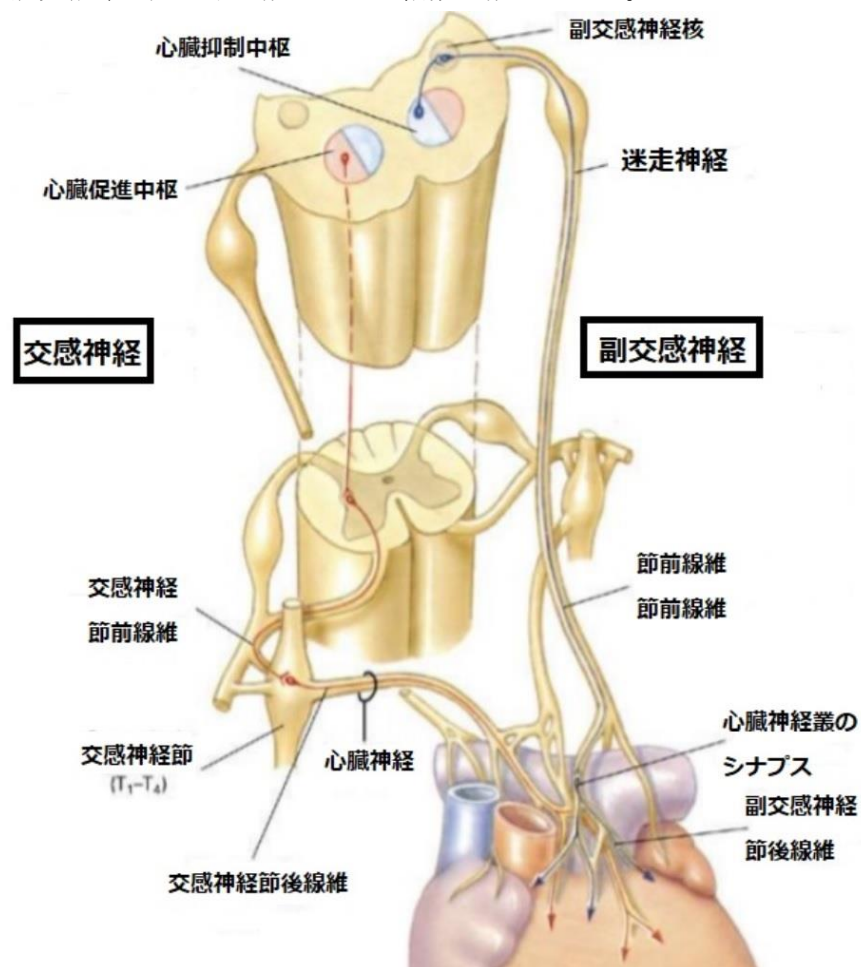


図 2.12 自律神経と心臓<sup>(24)</sup>

心臓拍動が調節される構造を 2 つのケースで比較することができる。まず、緊迫に動く必要がある場合のように、緊張する場合は交感神経が活性化される。この場合、図 2.13 に示すように脳で副腎髄質に信号を送り、副腎髄質ではエピネフリンやノルエピネフリンのようなアド

レナリン性神経伝達物質が洞房結節の  $\beta$  受容体に伝達され、心房収縮に関与し、まもなく洞房結節に繋がった房室結節が反応し、心室の収縮とともに心拍数が増加する。また、交感神経は複数の臓器と多発的につながっているため、交感神経が活性化すれば心臓だけではなく、肺にも即時な反応を起こして呼吸数を増やして身体が酸素をより多く吸収し、増加した心拍数を利用して酸素が速やかに血を通じて人体の各部位に伝達する。逆に、危機から脱して安定が必要な時期になれば、交感神経の活性化が止まり、副交感神経が活性化される。

この場合は脳や延髄などでそれぞれの臓器に個別に信号を送り臓器に反応を起こすようになり、その際には図 2.13 に示すように主に心臓とつながった迷走神経の末端からアセチルコリン(Acetylcholine, Ach)のようなコリン(Choline)性神経伝達物質がムスカリン受容体(Muscarinic receptor, M2)に伝達され、洞房結節から分泌されるノルエピネフリン(Norepinephrine, NE)のようなアドレナリン性化学物質の  $\beta$  受容体の伝達を妨げ、心臓の拍動が遅くなる。

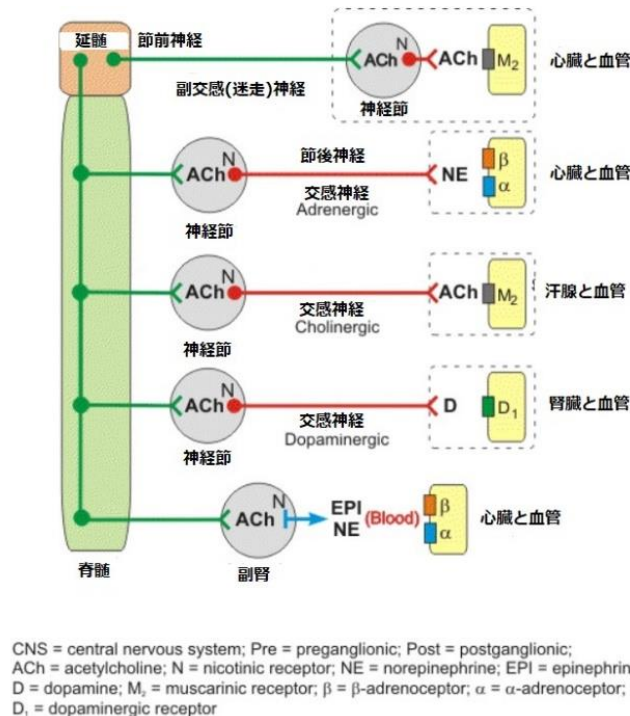


図 2.13 交感神経系の神経伝達<sup>(25)</sup>

前述のように交感神経は脊髄の神経節から複数の臓器へとつながる受容体の間に多発的に繋がっているため、心拍動を増やす場合には心臓だけではなく、肺の呼吸数の増加など他の臓器とともに同時多発的な変化を見せることになる。逆に副交感神経の迷走神経は神経節が当該臓器に個別につながっている。そして、受容体が該当臓器とほとんど付いており、節後線維(Postganglionic fiber)がないといわれるほど神経節が該当臓器に近い。心臓の交感神経の活性化の時に心拍動が早くなる反応速度より(5秒程度かかる)、副交感神経が活性化して心拍動が遅くなる反応速度の方が速い。そして、このような違いを利用して交感神経と副交感神経の活動を区別することができる<sup>(22)</sup>。

### 2.6.5 時系列分析

交感神経が活性化され、心拍数と呼吸数が高まっている時よりも、副交感神経が活性化され、安定した状態の時に心臓の対応力が上昇しますが、このような心臓の対応力を判断する基準が心拍変動(Heart Rate Variance, HRV)である。

すなわち、心臓の拍動数を評価するのではなく、拍動数の変化自体を評価するものとして、主に心拍間隔(RRI=NNI)の変化を分析する。

基本的に RRI の変化を記録したタコグラム(Tachogram)を使用するが、グラフ上の RRI の振幅の大きさや変化の標準偏差や分散、特定数値以上を超えた回数などを使用し、心拍変動性を分析する。グラフの形の変化幅が大きく、不規則なほど健康でストレスが少なく若いという意味に解釈できる。時間領域の分析指標は、測定対象者の年齢が高くなるほど数値が低くなる傾向がある<sup>(14)</sup>。

### 2.6.6 周波数系列分析

RRI を用いて周波数分析を行うことも可能であるが、RRI は時系列のデータであるため、正弦波振動を持っている。このような振動は数学的計算を通じて周波数領域に変換し分析することが可能である。

星から観測される光の強さを類推してその星のエネルギーを知ることができるが、その光のデータをプリズムとして色要素に分離することでその星の化学的構成も知ることができる。同様の原理で、図 2.14 に示すように RRI を全体の変動を構成する周波数成分に分離することが可能である。

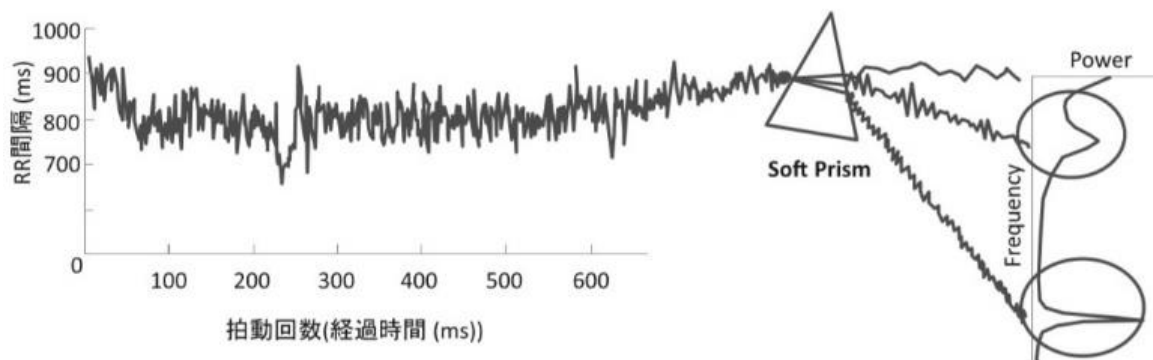


図 2.14 心拍の R-R 間隔と周波数解析<sup>(26)</sup>

このように分離して分析することをパワースペクトル解析(Power Spectrum Analysis, PSD)という<sup>(17)</sup>。このような分析は高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform, FFT)や自己回帰モデル(Auto regressive, AR)を使用することができる。

心拍変動に対するスペクトル分析の初期は FFT を主に使用していたが、最近にはスペクトル解像度が大きく、信号の雑音に敏感でない AR アルゴリズムを使用する<sup>(22)</sup>。図 2.15 は時系列指標である RRI データを PSD スペクトルに分析する過程を示す。



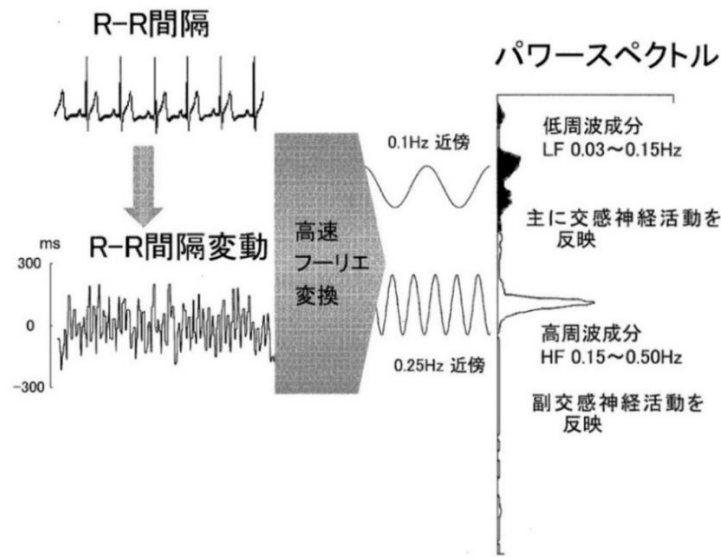


図 2.15 心拍変動パワースペクトル解析による自律神経活動評価<sup>(27)</sup>

スペクトル分析を行うと、特定の周波数帯で時系列資料である RRI から信号を分解することが可能である。すなわち、時間関数を周波数関数に変換し、特定の周波数帯の総量(Total Power)を測定する。このような分析を通じて、自律神経系の変化が特定の周波数帯に影響を与えることが明らかになった。

パワースペクトルは 0–0.5 Hz の周波数帯域で構成されており、極超低周波数帯域( $\leq 0.003$  Hz, ULF)、超低周波数帯域(0.0033–0.03 Hz, VLF)、低周波帯域(0.03–0.15 Hz, LF)や高周波帯域(0.15–0.50 Hz, HF)の四つの帯域として分解されることができる<sup>(14)</sup>。

心臓拍動変化のスペクトル解析から得られた総量を周波数帯 0.03–0.15Hz で積分したことが LF(Low Frequency)で、血圧から由来された成分として交感神経の成分も含まれる。また、周波数帯 0.15–0.50Hz で積分したことが HF (High Frequency)で、呼吸活動から由来された成分として副交感神経の成分も含まれる<sup>(28)</sup>。

スペクトルの構成は、周波数(ヘルツ)と各構成要素の面積(あるいはパワースペクトル密度)によって測定される振幅によって評価される。分布の非対称性としてパワー値の自然対数(natural logarithm, ln)や一般化された値(normal units, nu)で表現できる<sup>(29)</sup>。HF のスペクトルは身体的な恒常性の維持と関連した迷走神経緊張度のような副交感神経の調節能力を反映する<sup>(30)</sup>。

周波数系列分析法が時系列分析法より短期測定に有利だ。しかし、24 時間以上の長時間測定された時系列と周波数系列のデータは非常に高い相関関係を持つようになる。例えば RRI の標準偏差を示す時系列指標 SDNN は自律神経の力を示す周波数系列指標 TP と、迷走神経の緊張度を示す時系列指標 NN50 や pNN50 は副交感神経の活性度を示す周波数系列指標 HF と数学的、生理的な相関度が高いため、似たような形態の変化を見せるようになる<sup>(31)</sup>。

本研究で時系列指標と周波数系列指標の測定結果、記録されたデータの相互間の類似性は第 6 章に示す。

## 2.7 結語

ISO(国際標準化機構)の源則からもわかるように、一般的なストレスという概念は **Strain**、すなわち負担というものであり、ストレス自体は因子ではなく生体状態として外部環境の要求に対する反応である。疲労はそのような負担によって生じた損傷だ。またストレスはこのような損傷効果だけでなく促進効果も持っているが、一定範囲でのストレスは業務に慣れて熟練度を高めるなどの肯定的な影響も勤務者に与えるということが分かった。

このようなストレスの影響が適当な範囲なら、生活サイクルの中での重要なポイントとなり、良い生体リズムを作り出したり、何かを学習したり、業務能力を向上させるのに肯定的な影響を与えることができる。また、とても小さなストレスは、むしろ勤務者に無力感を与え、否定的な影響を与えることも推測できた。しかし、疲労は休息を取ってこそ回復が可能であり、ストレスの結果から生じた損失そのものを意味するので、ストレスとは違って肯定的な意味はないと言える。また、個人によってストレスへの対応力や回復力が異なるため、ストレスが高いからといって必ずしも疲労が大きくなるわけではない。しかし、実際にストレスと疲労は相互に因果関係的な部分が多いことから、明確に定量的に区分することは困難である。

本研究では、解釈の利便性のために ISO(国際標準化機構)の原則で規定した概念を活用した。本研究で意味する心的負荷の概念は、メンタルワークロード(Mental workload, MWL)としてストレスと疲労の両方を含む概念である。

ストレスや疲労による MWL は身体的な変化をもたらす。ストレスに対する身体の反応の中で自律神経系の SAM、HPA 系の二つの信号伝達体系がある。そして、そのような信号伝達体系が交感神経系と副交感神経系は異なる方式で心臓に影響を与える。また、交感神経が活性化した時に心臓の拍動が早くなる反応速度より副交感神経が活性になって、心臓の拍動が遅くなる反応速度がより速い。

このような体制を考えると MWL を緩和させるためには、HPA、SAM 系を逆転させる方法が有用であるという解釈が可能である。人の心臓はその時の環境によって可変的に心臓の拍動を調節する。健康な人ほど環境や動きの細かい差にも心臓が敏感に反応して心臓の運動性を変化させて最適の状態を維持してくれる。反面、健康に異常があったり、過度のストレスや疲労を受けた場合には、このような心臓の細かな対応が弱くなる。そのような影響を受けた心臓では拍動の変動性が発生するが、このような心拍変動が心的負荷、すなわちストレスと疲れを測定する指標になる。

また、MWL の測定において心拍間隔に関連する指標で分析が可能であるという結果の論文も存在する<sup>(32)</sup>。心拍変動の分析は時系列分析と周波数系列分析が存在する。短時間分析には周波数系列分析が、長時間の分析には時系列分析が有利だが、24 時間以上の長時間の測定において時系列測定と周波数系列の測定結果は数学的や生理学的に似た結果を示す(SDNN は TP と、NN50 や pNN50 は HF と高い相関度を表す)<sup>(31)</sup>。本研究で使用した機器は前述のように時系列指標と周波数系列指標、二種類の指標の測定が可能であり、交代勤務時間中に測定が行われたため、測定された二種類のデータをすべて活用して比較と分析を行った。また、ストレスと疲



労のデータを比較し、各オペレーターが受けているストレスと疲労について、どれだけの対応力や回復力を持っているかを分析した。そして、このような対応力と回復力を交代勤務の耐性として規定し、結果を導き出した。

## 第3章 交代勤務耐性

本研究の主な目的である交代勤務耐性に関しては、交代勤務耐性を定量化できる指標が必要である。そのような指標を発見するためには、交代勤務耐性に影響を及ぼす解剖学的な身体の構造を確認する必要がある。

### 3.1 交代勤務の特徴

交代勤務とは、通常の事務室の運営時間を超える業務環境の運営時間を作るために、2 つ以上の勤務チーム(交代)を配置することをいう<sup>(33)</sup>。ポータラジオの場合、船舶の出入港には時間の制約がないため、24 時間勤務をしなければならない。

したがって、すべての勤務者が朝出勤して夕方に退勤することはできず、誰かは夜も寝ずに勤務をしなければならない。それで、交代勤務は一般的な人の生体リズムに合わない勤務形態だと言えるし、当然、それによる否定的な影響があると考えられる。

交代勤務は生体睡眠周期の攪乱を発生させ、睡眠障害(Shift Work Sleep Disorders, SWSD)、疲労、憂鬱、不安などの否定的な影響を勤務者に及ぼすことになる<sup>(34)</sup>。

朝早く勤務を始め、不規則な勤務時間と頻繁な夜間勤務をするフィンランドのエンジニアたちの研究から、交代勤務続くほど、エンジニアたちの眠気が増加し、疲労度が高まることが分かる。この研究でエンジニアの疲労度は 22-04 時間帯の勤務が最も高かった<sup>(8) (35)</sup>。

### 3.2 ポリヴェーガル理論(多重迷走神経理論)

1915 年に生理学者ウォルター・キャノン(Walter Cannon)は急性ストレス反応である闘争・逃走反応(Fight-or-flight response)について説明した。このようなストレスやトラウマに対する連鎖反応は闘争・逃走反応だけではなく、もっと具体的に Freeze(過覚醒, Hypervigilance)、Flight、Fight、Fright(擬死, Tonic Immobility)、Faint の順で説明することができる<sup>(36)</sup>。

初期の凍り付き反応(Freeze)は、背側無髄迷走神経(Dorsal unmyelinated vagal nerve)の作用で発生し、危険な状況でむしろ動かない反応だ。これは stop、look、listen 反応に関連する。

危機状況を正確に把握するためや、中途半端に動けば、かえって他の危険にぶつかる可能性に備えた警戒反応だ。

これは志向(Orienting)反応で副交感神経によって伝達される。主に慢性的なストレスに対する反応である HPA 系の身体作用と関連がある。

哺乳類の視覚皮質と網膜が主に動く物体を感知しやすいように進化したため、動かない方が捕獲を避ける可能性が高くなる。しかし、捕食者にすでにばれていれば、追加措置が必要になる。

この時は SAM 系の交感神経的な身体反応が起き、現在の危険な状況に立ち向かって戦ったり逃走したりする。これが闘争・逃走反応である。

その次には捕食者と直接的な身体接触をする間の擬死(Fright, Tonic Immobility)である。死んだふりとも呼ばれる。すでに捕食者に捕まってから、動きながら反抗するよりは動かない動物の反応で説明が可能である。これは、暴行を受けた瞬間に抵抗できない被害者の行動とも一致する。

このような緊張性不動(Tonic Immobility)以降は、背側無髄迷走神経に関わる副交感神経系の支配が大きくなり、弛緩性不動またはシャットダウン状態となり、心拍数が少なくなり血管が拡張して血圧が下がる。覚醒度が低くなり、身体が弛緩し、血管迷走神経性失神である Faint(Vasovagal syncope) が引き起こされる可能性がある<sup>(36)</sup>。これで副交感神経の緊張が必ずしも安定した状態での肯定的な反応だけを意味するのではないということが確認できる。

副交感神経は凍り付き反応(Freeze)のようにストレスの反応で役割をするが、休息状態のようなストレスの回復と関連した弛緩状態を促進することにも関与することは矛盾すると考えられる。これに関連してポージェス(Stephen W. Porges)のポリ ヴェーガル理論(Polyvagal theory)を確認する必要がある。

ポージェスは数十年間、標準観点を変える自律神経系に対する研究を行い、一般的に精神療法と健康管理に大きな影響を与えた。ポージェスの調査結果によると、自律神経系は二つではなく三つで構成されており、絶対的に相互的なものではないという<sup>(10)</sup>。BESSEL A. VANDER KOLK の論文(2006)によれば、副交感神経には腹側迷走神経複合体(Ventral vagal complex, VVC)と背側迷走神経複合体(Dorsal vagal complex, DVC)の二つの枝がある。

VVC は交感神経系の活動を抑制する役割をし、周辺環境に関与したり関与を止める役割をする。こころの問題を持っている人たちから迷走神経の調整能力が低下することと、腹側迷走神経の調整力の欠如はトラウマを持っている人が他の人との交際で発生する喜びに反応できないことと関連があるという<sup>(37)</sup>。

これで、VVC は他の者との関係を調整する社会活動との関連が深いと解釈することが可能である。これは迷走神経が単に副交感神経としての一つの類型だけではなく、多くの類型を持っているということを意味する<sup>(38)</sup>。

腹側迷走神経は有髄神経で、背側迷走神経は無髄神経である。無髄迷走神経は哺乳類を含む爬虫類、両生類、魚類などの脊椎動物などから発見され、系統発生学的に髄鞘化された迷走神経はより進化したただ哺乳類でのみ発見される。

髄鞘化(ミエリン化、Myelinated)というのは脊椎動物の進化過程で神経の潜在的な活動伝導速度を向上するために、まるで水が漏れているホースにダクトテープをつけるように髄鞘(ミエリン、Myelin)と呼ばれる断熱体のようなものを軸索(Axon)を包む方式で発達したことを意味する<sup>(3)</sup>。

すなわち、髄鞘化されていない背側迷走神経より髄鞘化された腹側迷走神経がより発達した形態だと言えるし、反応速度もより速いことが分かる。表 3.1 は自律神経系が系統発生学的に区分される三つの反応体制を示す。

表 3.1 危機の対応の仕方と三位一体の自律神経系<sup>(38) (39)</sup>

神経系	起源（典型）	危機対応の仕方	特徴
副交感神経系 (迷走神経背側複合体)	無脊椎動物、 ぜん虫(爬虫類)	不動、硬直、 死んだふり、 シャット・ダウン	
交感神経系	脊椎動物(哺乳類)	行動 「闘争か逃走か」	
社会神経系 (迷走神経腹側複合体)	哺乳類一 特に霊長類に発達	他者との意思疎通 適応、自己鎮静	ミエリン鞘を持つ 神経、 高速な情報伝達

図 3.1 は自律神経系の正常な機能とストレス反応の区分を示す<sup>(40)</sup>。図 3.1 に示すように自律神経は交感神経と副交感神経だけでなく、社会神経まで含めた 3 種類の神経系で構成されている。

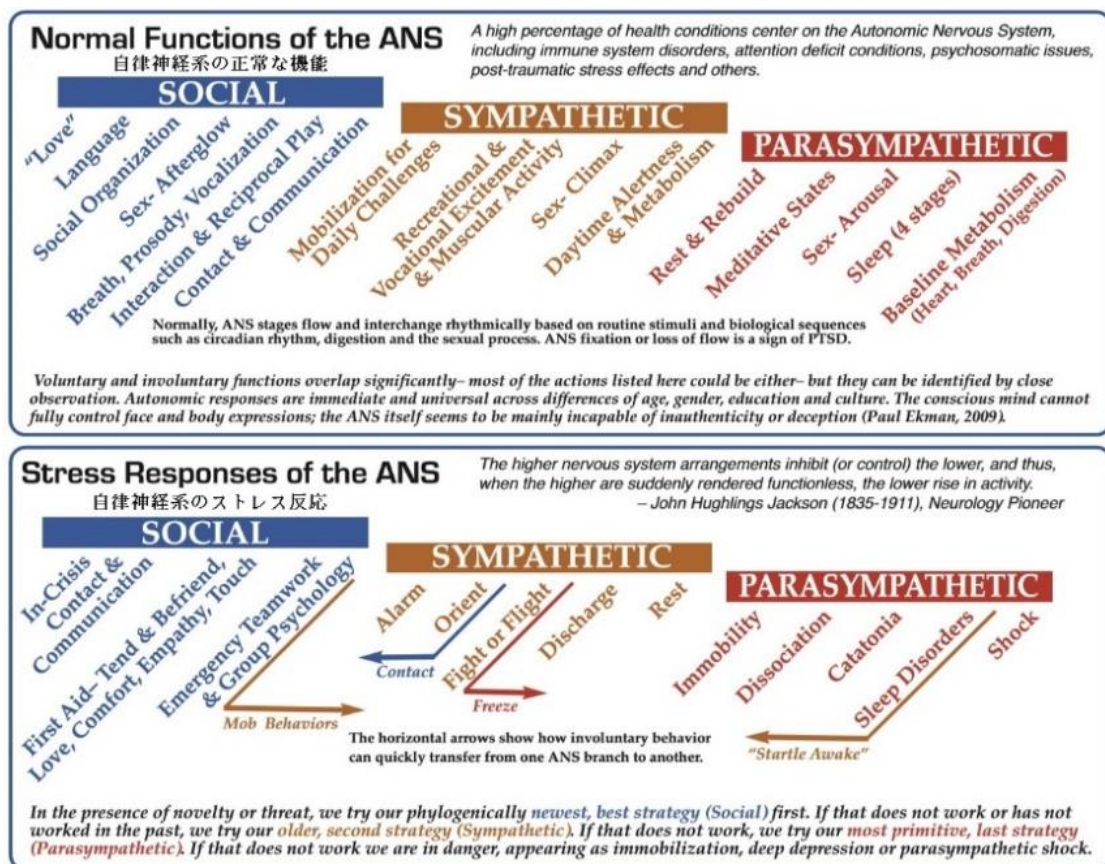


図 3.1 自律神経の正常機能とストレス反応<sup>(10)</sup>

### (1) 社会神経系(Social Nervous System)

これは腹側迷走神経の「社会的関わり」反応や迷走神経腹側複合体(VVC)と関連がある<sup>(68)</sup>。普段は社会活動において言語的な活動や身体的な相互作用、恋愛のような意思疎通的な機能を果たすが、危険にさらされるなどのストレス的な状況では作戦を練るなどの意思疎通、応急処置、チームワークや集団思考といった反応を見せるが、HPA axis を安定させ、腹側有髄迷走神経(ミエリン鞘を持つ神経、Ventral myelinated vagus nerve)が関与することで交感神経活性化を抑制し、安定した行動を行わせる。速度が速いから短時間でも活動の目的を達成できる<sup>(10)</sup>。

### (2) 交感神経系(Sympathetic Nervous System)

主に積極的な反応と関連している。普段は日常的な活動や肉体的な娯楽活動、新陳代謝にかかわるが、ストレス状況では警告、志向、闘争・逃走反応に係わり、交感神経-副腎系の反応である SAM axis と影響を与えて、危機な状況で敵と戦ったり逃走させたりする<sup>(10)</sup>。

### (3) 副交感神経系(Parasympathetic Nervous System)

原始的な無脊椎動物から存在する神経として普段は休憩や再充電、瞑想にふけった状態、4段階の睡眠、基本的な新陳代謝と関連して、ストレス状況では緊張性不動、睡眠障害、ショックのような状態に影響を与え、擬死(Feigning death)、血管迷走神経性失神(Vasovagal syncope)、行動性停止(Behavioral shutdown)など主に強制的に動かない反応に影響を与える。

これは迷走神経背側複合体(DVC)、背側無髄迷走神経(Dorsal unmyelinated vagal nerve)の「固まる」反応や凍り付き反応と関連がある<sup>(10)</sup>。すなわち、ポリヴェーガル理論では副交感神経の迷走神経を腹側と背側の二つに分けており、背側迷走神経は凍り付き反応などのようなストレス反応に関与して腹側迷走神経は安全な状態での意思疎通のような社会活動や危機状況での落ち着いた行動に関与するという<sup>(10)</sup>。

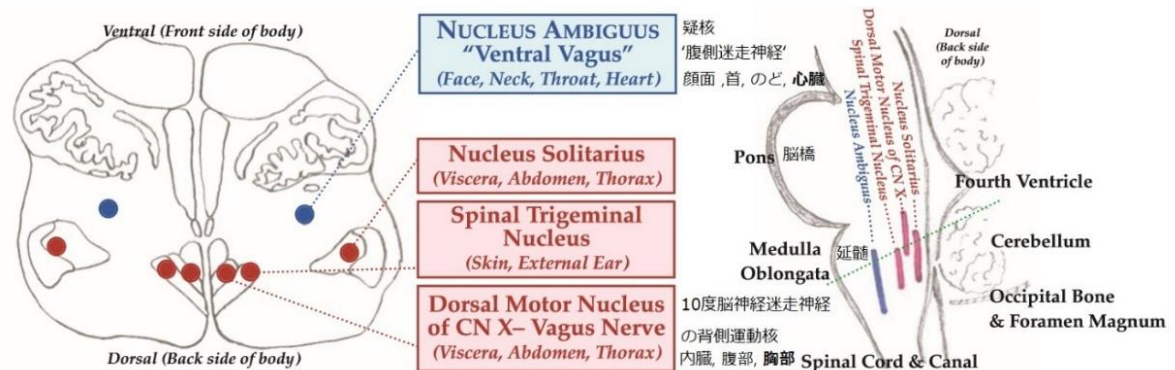


図 3.2 「ポリヴェーガル」-脳幹での迷走神経の4つの核<sup>(10)</sup>

図 3.2 は延髄における迷走神経信号のスタート点を示している。背側迷走神経は迷走神経の背側核(Dorsal nucleus of vagus)から始まり、腹側迷走神経(Ventral vagus)は疑核(Nucleus ambiguus)から始まる。結論的に、背側迷走神経は副交感神経と関連したストレス反応に関与し、腹側迷走神経とは解剖学的に分派していることが確認できる。

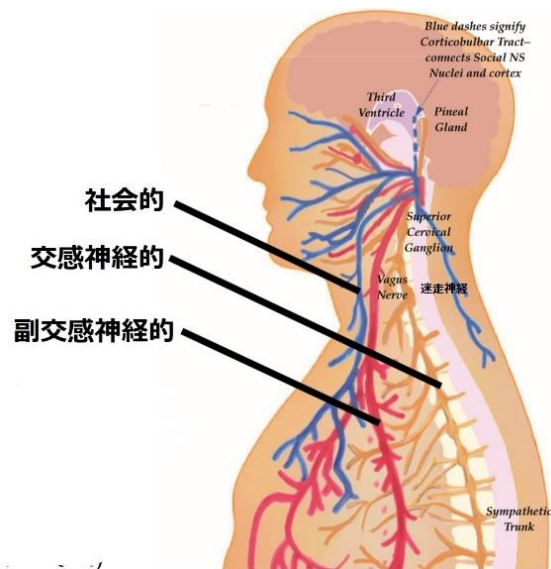


図 3.3 新中枢神経系解剖学<sup>(10)</sup>

腹側迷走神経は人間の社会生活において必ず必要な無意識な表情、しぐさ、聞き取り、声などの社会神経系の活動にかかわる。生まれてから短い時間で周辺環境に適応し、独立して生きていく他の哺乳類とは違い、人間は生まれてから完全な生存能力を利用できるようになる前に数年の時間を要する。霊長類は、はるかに複雑な構造の皮質を持っており、その成熟にはさらに多くの時間を要するので、他の動物よりもさらに高い母性結合が必要である。母性結束力を通じて、赤ちゃんは母親から社会神経系に関する声、聞き取り、表情を学習し、社会的機能のための意思疎通能力を学ぶようになる<sup>(10)</sup>。

そして、図 3.4 のように自律神経の三つの分派をそれぞれの反応によって三つの領域に分類することが可能である。

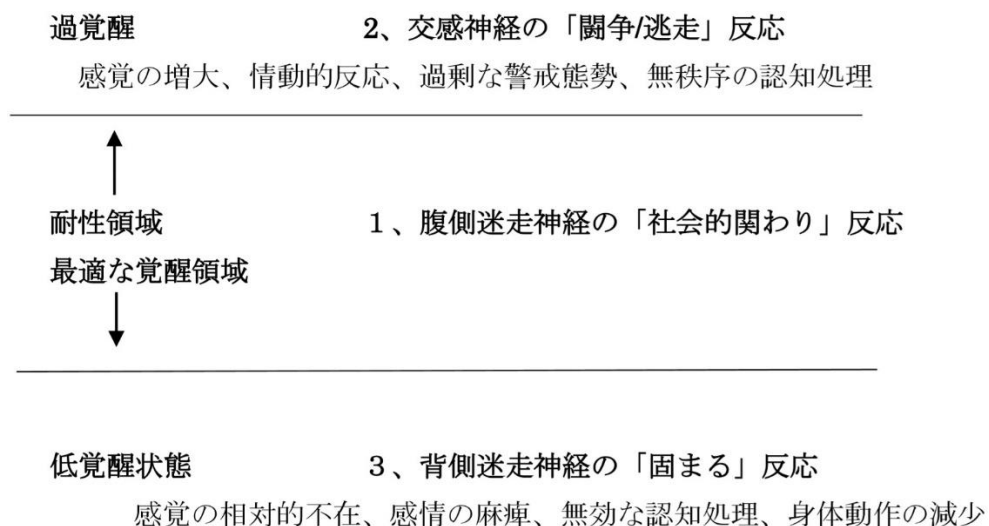


図 3.4 三つの覚醒領域とポリヴェーガル神経階層の相関関係<sup>(38) (41)</sup>



図 3.4 から分かるように耐性領域は腹側迷走神経の社会神経系(Social communication)の領域であることがわかる。また、過覚醒領域は交感神経の領域であり、低覚醒領域は背側迷走神経の領域であることが分かる。耐性領域の活性化は PTSD 等のストレス反応による損傷の回復にも役立つと考えられる。前述のように、背側迷走神経の活動は、ストレス反応に関わる。背側迷走神経は副交感神経なので、ストレスを受けて活性化すれば心拍数を減少させるが、ストレス反応としての強制的な交感神経の抑制であるため、長期間続く場合、身体に良くない影響を与えることになる。HPA 系の作用として慢性的なストレス疾患の原因になり得る。

代表的なのが PTSD として、危機の状況は過ぎ、背側迷走神経の活動で心拍数は低くなり、外見上は安定しているように見えるが、依然として身体の内部ではストレス反応が続いている状況である。そして安定時にストレス回復と関連する副交感神経の反応は腹側迷走神経が活性化して現れる。

迷走神経の腹側迷走神経複合体(Ventral vagal complex, VVC)による心拍に対する抑制活動により、広い範囲の社会適応性、親社会的が行動を可能にし、迷走神経トーン(Vagal Tone)が大きくなるほど、VVC の活動が大きくなり<sup>(58)</sup>、前述のような肯定的な行為の範囲がさらに広がるようになる。逆の場合は、中枢神経系を傷つける医学的な合併症や疾病と連関することになる。

また、VVC は心臓の拍動に歯止めをかける重要な役割も果たす。迷走神経トーンが高い状態では心臓の基準心拍数や休息時の心拍数を求めることができる<sup>(42)</sup>。

一般的にポリヴェーガル理論において耐性領域が高いということは腹側迷走神経が活性化していることを意味し、これは迷走神経トーン(Vagal Tone)と関連があることがわかる。迷走神経トーンは迷走神経の緊張度を意味する<sup>(69)</sup>。本研究における交代勤務耐性が高いことを表 3.2 からの耐性領域が広いものと解釈し、それを迷走神経の緊張度を測定することで比較できた。

急性ストレス反応である闘争・逃走反応が行き過ぎた場合、パニック障害(Panic disorder)や不安障害(Anxiety disorder)が発生することになる。また、慢性的なストレス反応はうつ病性障害に非常に大きな要因となるが、単極性うつ病(Unipolar depression)より進行した形態である双極性うつ病(Bipolar depression)患者の HF の数値が低く、LF/HF 比率(まだ検証されていないが、交感神経トーンの測定に使用された)の数値が高いことがわかった。すなわち、うつ病にうつ病に近づくほど、相対的に HF が LF に比べて低い状態になり、これは迷走神経トーン(Vagal Tone)の減少を意味する<sup>(43)</sup>。

### 3.3 耐性

ストレス耐性(Stress tolerance)は身体のストレスに対する反応を減らすことでストレス状態に陥らないようにする強靭さを意味する<sup>(2)</sup>。ストレス弾力(Resilience, レジリエンス)は外部環境によって発生する反応であるストレスに対して回復する能力である。

ストレスに対する反応が発生して身体で反応が起こってもその反応による被害を復旧し、または治癒する能力で治癒力とも言う。「ストレス耐性」と似ているが、ストレス耐性がストレス反応を抑制することで不適応状態に陥らないようにする「強固さ」を意味するのに対し、レジ

リエンスは一時的に不適応状態に陥ったとしても、状況に応じて自らを柔軟に変化させて回復していく「しなやかさ」を意味するところに違いがある<sup>(2)</sup>。すなわち、ストレスの耐性は、強風の吹く所で揺れない木のような丈夫さを示し、ストレスの弾力は強風に傾いても再び立ち上がる葦のような柔軟さを示す。「脆弱因子」を持っているとしても、「レジリエンス因子」が十分であればそれが作用し、深刻なものにはならない<sup>(2)</sup>。

交代勤務耐性(Shift Work Tolerance, SWT)は過去に Andlauer, Reingberg によって 1979 初めて定義されたが、交代勤務した後、否定的な結果を経験しないまま、交代勤務を継続する能力である(Ability to adapt to shift work without adverse consequences)<sup>(34)</sup>。しかし、新たに確立された交代勤務耐性には、精神健康や社会的機能変数(Mental health and social functioning variables)も含まれる<sup>(44)</sup>。最近は不眠症、睡眠障害、慢性疲労、不安と憂鬱 5 つで、交代勤務耐性を評価している<sup>(34) (45)</sup>。交代勤務耐性に影響を及ぼす追加要素としては、性格特性があり、睡眠習慣の柔軟性と無力感、強靱性、睡眠-覚醒周期で評価する。

強靱性は Kobasa(1979)によって紹介された<sup>(46)</sup>。強靱性はストレス的生活の事件に直面した際の一つの抵抗資源として機能する個人的な特性(Choi, 2012)である<sup>(34)</sup>。Kobasa は、強靱性は個人的特性の様式が相互に影響する献身(Commitment)、自己統制(Control)、チャレンジ精神(Challenge)で構成されているという<sup>(46)</sup>。

### 3.4 結語

交代勤務の耐性は、正常な身体リズムと合わない交代勤務をしながらも、できるだけ身体的な損傷を小さく受けるか、早く回復する能力である。それに関しては、副交感神経の役割が重要である。副交感神経である背側迷走神経の長期間の活性化はむしろ動かない状態だが、身体内的にはストレスが続く状態である。まるで PTSD 状態のように外部に現われる症状はないように見えるが、内的には激しいストレスを受ける状態になる可能性がある。トラウマ体験者は耐性領域が狭く、過覚性と低覚性の間を極端に移動しやすい。これと関連してポリヴェーガル理論の社会神経系の領域である腹側迷走神経の活性化が重要である。

脳幹での迷走神経の 4 つの核によって背側迷走神経と腹側迷走神経が解剖学的にも区分されていることが確認できた。腹側迷走神経の活性化は、迷走神経の緊張度を意味する迷走神経トーン(Vagal Tone)と関連があり<sup>(69)</sup>、腹側迷走神経が活性化すれば耐性領域が広がり、慢性的なストレス疾患の治療にも役立つ。ストレスを緩和させ回復すること、すなわち結果的に交代勤務耐性を向上させる方法は、HPA 系および SAM 系を逆転させ、腹側迷走神経を活性化させる方法があるといえる。



## 第4章 心的負荷の測定変数

本研究ではオペレーターらから得た測定データを計 10 の指標に換算して分析を実行した。測定データは、主に心拍変動 HRV を代替する RRI の時系列、周波数系列の測定値とこれを用いた計算から導き出されたものである。

### 4.1 LF と HF

LF(Low frequency,  $\text{ms}^2$ )は交感神経と副交感神経の両方の活動指標であり、LF/HF は交感神経活動の指標である<sup>(47)</sup>。HF(High frequency,  $\text{ms}^2$ )は全面的に副交感神経の影響を示す指標である<sup>(30) (47)</sup>。LF バンドは 0.04 で 0.15Hz の間の周波数を持っていて HF または呼吸バンドは 0.15 で 0.40 Hz の間の周波数を持つ<sup>(14)</sup>。LF は血圧と関連がある<sup>(17)</sup>。疲労を受けている状態ではエネルギー消失(loss of energy)が反映され、LF 値が低くなる。一般的に LF 数値が増加する場合、HRV は減少する。休息状態で深呼吸をすれば LF 数値が増大するが、これは交感神経ではなく副交感神経の活性化がその要因である<sup>(48)</sup>。自律神経機能測定のため従来から広く行われている心拍変動スペクトル解析は、安定時には一定の臨床的な有意性が認められるが、随意的に呼吸運動を行う発表時や深呼吸時には自律神経の評価指標として信頼性が低い<sup>(49)</sup>。(ゆっくりとした規則正しい呼吸は、パワースペクトルの HF ピークの振幅を増大させる<sup>(48)</sup>。)心肺機能低下の時、持続的なストレスや恐怖を感じる場合 HF は減少し、HF は年齢による減少幅が大きい。健常者の場合、昼間は減少し、夜に増加する。HF 数値が増加する場合、HRV も増加する。休息状態での LF 数値は、心臓に対する交感的神経の支配ではなく、圧反射の活動を反映する<sup>(14)</sup>。HF power は pNN50 と rMSSD と同じ時系列指標と高い相関性がある。低い HF 数値はストレスや、パニック恐慌状態、不安症又は憂いを示唆する。しかし、HF power 自体は、迷走神経の緊張度を反映せず、制限された条件の下で lnHF 数値として迷走神経の緊張度を推定することができる<sup>(14)</sup>。大まかに女性は高い HR と迷走神経の優位を示し、男性は低い HR と交感神経の優位を示す<sup>(14)</sup>。LF 数値は低く、HF の数値が高い人は過度なストレスや疲労に苦しむ場合が多い<sup>(22)</sup>。LF/HF 比率は交感神経と副交感神経の均衡度を意味する。交感神経が活性化すれば数値が高まり、副交感神経が活性化すれば数値が下がる<sup>(48)</sup>。しかし、LF/HF 比率が確実かつ明確な定量的な指標ではない。その理由は、

- (1) LF パワーは交感神経活動(SNS)の純粋な指標ではない。この周波数帯域の変動性の半分は副交感神経(PNS)に起因し、さらに少ない部分は不特定因子によって生成される。
- (2) PNS と SNS の相互作用は複雑で非線形であり、非常に非可逆的である。
- (3) 呼吸器および休息時の HR による攪乱要因は、測定期間中に LF/HF の割合に対する PNS および SNS の寄与度に関する不確実性を誘発する<sup>(14)</sup>。

本研究では、LF/HF 数値は交感神経を意味する SNS としてストレス負荷量と解釈して分析した。LF/HF 値が高い場合は、闘争・逃走反応のような交感神経の優位な状態と解釈できる。

## 4.2 TP

TP(Total Power, ms<sup>2</sup>)はトータルパワーという意味で、心臓拍動のスペクトル分析によって計算された ULF、VLF、LF、HF などのすべての周波数の総和である。

自律神経機能全体の機能を示す指標である。この数値は LF と HF の総和で表す。(LF+HF) 自律神経機能全体の働きを示す指標。加齢に伴い数値は減少する。この数字は LF と HF の総和で表す<sup>(28)</sup>。

$$TP = LF + HF(\text{ms}^2)$$

TP は自律神経活動の総量であるだけに、すでに受けた損失を意味する疲労に関する数値である。自律神経系の全体的な活性度と自律神経の調節能力を表し、慢性的なストレスを持っている場合は数値が減少する。

本研究には、TP を自律神経トーンとして自律神経系の調節能力として解釈した。TP 数値が高いことを疲労度が低いものと解釈し、TP 数値が低いことを自律神経活動量の損失を受けたものとみて疲労度が高いものと解釈した。

## 4.3 CCVTP

CCVTP は TP の変動成分の力から Component Coefficient of Variance(CCV)という統計量を求めて心拍変動成分の大きさの指標として用いている。CCV は変動係数と同じ次元をもつ量で、1 個の変動成分に起因する R-R 間隔の変動係数と考えられる。

自律神経の機能を示す指標として心拍数が高い場合は TP が高く出るため、TP 値を心拍数で補正した値である<sup>(28)</sup>。健康で若いほど数値が高く、年を取れば取るほど、疲労、ストレスを抱えているほど低く表われる。

$$CCV(TP) = \frac{\sqrt{TP}}{\text{Ave.RRI}} = \frac{\sqrt{SDNN^2}}{\text{Ave.RRI}} = SDNN/\text{Ave.RRI}(\%)$$

## 4.4 CCVHF

CCVHF は Coefficient of Component Variance HF 副交感神経指標として<sup>(51)</sup> ストレスに対する回復力<sup>(52)</sup>を表す。計算方式は CCVTP と同様である。

$$CCV(HF) = \frac{\sqrt{HF}}{\text{Ave.RRI}}(\%)$$

## 4.5 LFnu と HFnu

LFnu は LF Normalized Unit、HFnu は HF Normalized Unit を意味し、自律神経活動における交感神経と副交感神経の活動指標として全体的な自律神経活動である。

TP に対する LF と HF のそれぞれの寄与値である<sup>(30)</sup>。すなわち、LF に対する HF の大きさを計算することである<sup>(51) (53)</sup>。VLF 帯のパワーの変化について、LF、HF の要素が受けた影響を最小化して分析する方法である。主に 24 時間一日周期の心血管のリズムの相対的なパワーを

比較する方法で使用する<sup>(51)</sup>。

LFnu は相対的交感神経機能の発揮度で、身体的なものだけでなく衝動、興奮のようなメンタル的な面も示す<sup>(54)</sup>。

HFnu はスポーツと関連した分析で、数値が高いほど運動選手のコンディションや競技パフォーマンス、競技成績が向上することを示唆する報告がある。また、自律神経機能の改善を意味することもある<sup>(53)</sup>。

$$\text{LFnu} = \text{LF}/\text{TP} \times 100(\%), \text{HFnu} = \text{HF}/\text{TP} \times 100(\%)$$

昼は LFnu 値が大きく、夜は HFnu 値の方が大きい<sup>(31)</sup>。また睡眠中には HFnu 値がもっと大きく、覚めている中には LFnu 値がもっと大きい<sup>(22)</sup>。

#### 4.6 lnLF と lnHF

LF と HF の自然対数(Natural logarithm, ln)はネイピア数 e に対する LF と HF の log 値である。正常な呼吸をする条件下での lnHF 数値として、迷走神経の緊張度が推定できる<sup>(14)</sup>。

#### 4.7 SDNN

SDNN は Standard Deviation of NN の意味で全体 RRI の標準偏差であり、副交感神経活動の指標<sup>(57)</sup>となっており、RRI 変動が大きいほど SDNN 数値が高くなる。TP が RRI の分散値なので、TP の平方根である。心拍変動の全般的な推定値を示し、ストレスに対する抵抗度を意味する<sup>(22)</sup>。

$$\text{SDNN} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{RRI}_i - \text{RRave.})^2} = \sqrt{\text{TP}}(\text{ms}) \quad (55)$$

この指標は長時間測定を行う場合、HRV を判断するのに最も簡単で有用な測定指標である。そのため、死亡率(Mortality)の重要な予測変数である<sup>(17)</sup>。

内在活力や迷走神経活動度も示す指標である<sup>(56)</sup>。SDNN は TP と数学的、生理学的に高い相関性を示し、似たような様相を表す<sup>(31)</sup>。

#### 4.8 CVRR

CVRR は Coefficient of Variation R-R interval の意味で自律神経活動指標指標<sup>(51)</sup>として特に副交感神経活動の指標<sup>(57)</sup>とされている。

心拍の揺らぎとしての自律神経活動の大きさを推定する<sup>(26)</sup>。ストレスに対する反応力として利用されることもあり、高齢であるほど減少する。動脈硬化の評価と相関性がある。

$$\text{CVRR} = \text{SDNN}/\text{Ave.RRI} \times 100(\%)$$

副交感機能の相対的迷走神経活動度<sup>(56)</sup>や心の元気度(安静時 CVRR)<sup>(52)</sup>を意味することもある。

#### 4.9 pNN50

NN50: NNI (Normal-to-Normal Interval)隣接する NN 間隔(心拍の各波動で QRS 付合体間の間隔例: RRI)間の差が 50msec より大きい場合の総個数である。

$$\text{NN50} = \text{Number of } (RR_{i+1} - RR_i) > 50 \text{ ms}^{(18)} (\text{times})$$

迷走神経緊張の指標とされている<sup>(48) (57)</sup>。糖尿病患者の自律神経病症と関連がある<sup>(55)</sup>。短期間の HF による心拍変動の構成要素である<sup>(31)</sup>。

pNN50: 全体 NN の間隔の総本数で NN50 が占める割合である<sup>(18)</sup>。

$$\text{pNN50} = \frac{\text{NN50}}{N-1} \times 100^{(55)} (\%)$$

pNN50 や NN50 が大きいほど、心臓の変動性が大きいということを意味する。いずれも HF に関連する副交感神経の活性化度を示して、二つとも迷走神経の緊張の大きさを表わす指標である<sup>(48)</sup>。pNN50 は rMSSD と HF power とともに副交感神経活動と密接な関連がある。生体自己制御の分析において短期 SDNN より信頼できる指数である<sup>(14)</sup>。NN50 や pNN50 は周波数系列の指標である HF と数学的、生理学的に高い相関度を持っているので両者は似たような様相を見せるようになる<sup>(31)</sup>。

#### 4.10 r-MSSD

r-MSSD は連続して隣接する RR 間隔の差の 2 乗の平均値の平方根として、これも HF と関わり、短時間の副交感神経の活性化度を示す。

rMSSD の低下は副交感神経活動の低下と解釈され<sup>(57)</sup>迷走神経の緊張強度を示す<sup>(48)</sup>。心拍変動の短期的な推定値も意味し<sup>(22)</sup>、脳栓症や心室細動と関連がある。

$$\text{rMSSD} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (RR_{i+1} - RR_i)^2} \text{ (ms)}^{(55)}$$

24 時間の rMSSD 数値は pNN50 と HF power と深くつながっている。また SDNN より副交感神経の影響をより大きく受ける<sup>(14)</sup>。

#### 4.11 結語

全体として指標を分析すると、HF は確かに副交感神経の直接的な活動指標として、迷走神経の活動と関連がある。HF を用いて分析した指標を見ると、明らかに迷走神経の緊張に関連する高い HF 値は副交感神経の亢進を示唆する指標となる<sup>(48)</sup>。しかし、HF power 自体は、迷走神経の緊張度を反映せず、制限された条件の下で lnHF 数値として迷走神経の緊張度を推定することができる<sup>(14)</sup>。

短期測定では周波数系列分析法が時系列分析法より有利だが、時系列分析法の中でも rMSSD や NN50 のような指標は短期的分析にも使用される<sup>(22)</sup>。

時系列分析と周波数系列分析との関係で時系列の指標である rMSSD と pNN50 は周波数系列の指標である lnHF の影響によって即刻的(Instantaneous)で反応する。そして時系列の指標で

ある SDANN(5 分 NN の間隔の平均の標準偏差)は lnULF の影響によってゆっくり反応することになる<sup>(17)</sup>。

交感神経が活性化されれば、5 秒程度の時間遅延の後に心拍数が増加し始めて 20 秒で 30 秒ぐらい経った後から定常状態(Steady state)に到達する。これとは対照的に、迷走神経の活性化による心拍数の変化はほぼ即刻に行われる。

これで心臓に対する反応が速いのは副交感神経の要因、反応が相対的に遅いのは交感神経の要因だということが推定できる<sup>(22)</sup>。

副交感神経が亢進したからといって、必ずしもストレスの回復力が良いという意味ではない。前述のように凍り付きや死んだふり反応のような場合は、背側迷走神経(DVC)の活性化によって外部的では安定化されているように見えるが、先のポリヴェーガル理論における低覚性の状態で意図的に動きを抑えるものである。

このような状態が続けば、PTSD などの身体に良くない影響を及ぼすことになる。反面、VVC 腹側迷走神経の活性化は確かに社会的関係の耐性領域への回復に大きく役立つ。このような腹側迷走神経の活性化は迷走神経トーン(Vagal tone)が前提となるが、迷走神経トーンは迷走神経の緊張を意味する。すなわち、迷走神経が緊張すれば腹側迷走神経が活性化してストレスに対する耐性や回復に役立つと言える。

このような理由で本研究では交代勤務耐性を推測する指標として迷走神経の緊張度を示唆する rMSSD、pNN50 と lnHF と自律神経機能の改善を示唆する HFnu、ストレスに対する回復力を示唆する CCVHF を使用して分析した。NN50、pNN50 および rMSSD は連続 NN の間隔の間の差を使用して計算する。この計算は、NN 間隔差によって異なるため、主に HR の振動を指数化し、延長された時系列の傾向に大きな影響を受けない<sup>(14)</sup>。

296, 247 人の健康な参加者を対象に、メタ分析(Meta-analysis)を実施した Koenig J、Thayer JF の研究(2016)で 50 個の HRV の項目が調査された。その結果、女性は平均 HR が高いにも関わらず、相対的に迷走神経的優位を示した。一方、男性は低い HR にも関わらず、相対的 SNS 優位を示した<sup>(14) (59)</sup>。これにより、HRV に対する性別間の差も存在することがわかる。

また、15 歳から 83 歳の間の男性走者 72 人に対する De Meersman RE の研究<sup>(60)</sup> (1993)で、身体的活動が心拍数変動性をさらに高めるという結果がある。これは有酸素運動が心拍変動に役立つことを暗示する。

田島 多恵子の研究(平成 30 年)では、運動を最初に始めた時はそうではないけど、結果的に運動を続けて運動に慣れれば、迷走神経が活性化する<sup>(57)</sup>。

M.A.McNarry と M.J.Lewis の研究(2012)では、有酸素運動より年が HRV により大きな影響を及ぼすという結果を確認することができる<sup>(61)</sup>。

A.E.Aubert と B.Seps、F.Beckers の研究(2003)では、運動中の心拍数は交感神経調節量の増加と副交感神経活動の撤回によって調節されるとされている。運動中は運動の負荷に比例して HF の数値が急激に減少するが、LF の数値も減少するため運動中の LF/HF 数値は心臓調節能力を評価するのに適した指標ではないという<sup>(62)</sup>。

2004 年、米国オリンピック代表最終選考会での 18 歳から 33 歳の間の 145 人の陸上選手らを測定した Berkoff の研究結果(2007)では運動の種目とは関係がなく、女性選手では、男性選手より pNN50、HFnu の数値が高く出ており、男性選手は女性選手より LF、LF/HF が高く出た<sup>(14)(63)</sup>。これが確かに女性は副交感神経が、男性は交感神経が優位にあることを示唆する。もちろん、LF/HF の割合が心臓の自律神経の均衡に対する正確な測定ではないという主張もある。

これは、過去の HF ピークは心臓副交感神経活動を反映するものと広く信じられ、LF はもっと複雑ではあるが支配的な交感要素を持っていると仮定されてきたが、George E. Billman の研究(2013)では、LF/HF 比率を使って健康と疾病に関して交感神経の活動を定量化することが無理であり、このような仮定が適用されない事例も多いという<sup>(64)</sup>。

しかし、LF/HF 比率が疾病や疾病に関連する診断における直接的な根拠資料としての価値は低いかもしれないが、今回の研究のように、長期間の大まかな心的負荷に関連する交感神経変化の分析においては、明らかに参考的な役割としての価値があると考えられる。その理由は、今回の研究で測定された 8 人の心拍変動と関連する否定的/肯定的な個人別の差が明らかに発見され、心拍変動による個人別差が LF/HF 値の差とほぼ符合したためである。

例えば、交代勤務耐性が低いと思われる 3 人の心臓拍動の変動性(HRV)を示唆する指標は低い反面、(下位 3 位内に含まれた 3 人)その 3 人の LF/HF の数値は相対的に高く(HRV 下位 3 人が LF/HF の上位 3 位の中に全て含まれたこと)測定された。もちろん、肯定的な反応については詳細には差が発生したが、今回の研究では HRV と LF/HF が結果的に一致した解釈が可能であった。

今後研究を続けるべき事項であるが、詳細かつ直接的としての LF/HF 比率としてではなく、長期間のデータを用いた参考的な分析データとしての価値ははっきりと存在すると思われる。

## 第5章 心的負荷の測定

交代勤務耐性と関連がある指標に対する考察の後、その指標を測定できる方法を調べる。また、測定結果導出されたデータとの比較のための測定対象者の基本的な特性を把握するアンケートの内容も検討する。

### 5.1 環境と条件

生体情報の測定は東洋信号通信社のポートルラジオ1局を選択して平成31年5月から10月の間3週にわたって8人の船舶情報オペレーターを測定した。

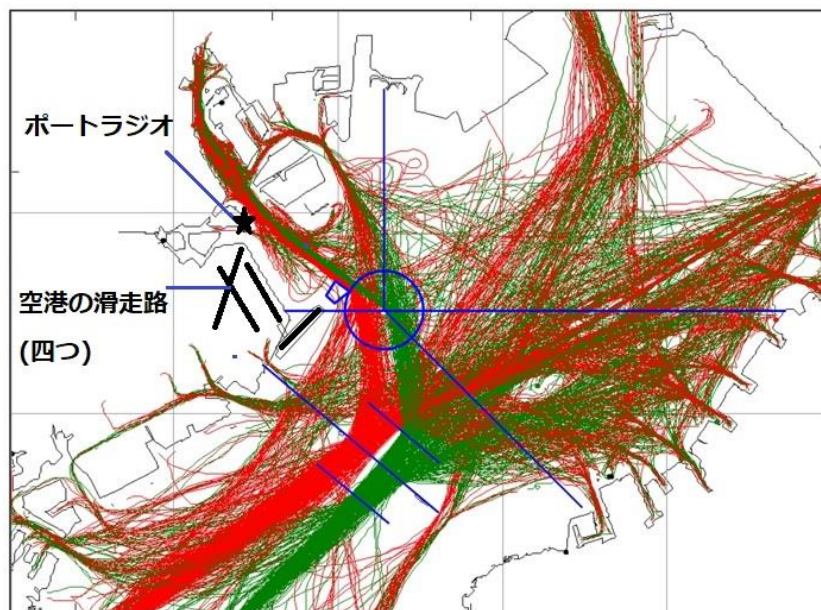
測定はオペレーターの生体情報を収集できる Silmee Bar type Lite を使用して測定者が事務室に立ち会い測定するリアルタイム測定と各オペレーターの交代勤務耐性と現在のオペレーターの自覚できるストレスと疲労などを自ら記録するアンケート測定を実施した。

(1) 測定期間: 平成31年 5.21-22, 5.22-23, 5.26-27, 6.10-11, 6.13-14, 6.16-17, 10.1-2, 10.7-8

(2) オペレーター別測定時間:

- ① 45.8Hrs(昼夜勤4回) ② 53.2Hrs(昼夜勤4回,日勤1回) ③ 45.5Hrs(日勤9回)
- ④ 31Hrs(昼夜勤2回) ⑤ 16Hrs(昼夜勤1回) ⑥ 16Hrs(昼夜勤1回)
- ⑦ 16Hrs(昼夜勤1回) ⑧ 16Hrs(昼夜勤1回)

図2.4に示すように測定を実施したポートルラジオは、船舶の通航量が多く、船舶間の衝突の危険が高い海域の近くに位置している。また、ポートルラジオから近いに空港も存在する。



※ 船舶の AIS 航跡, 平成 23 年 11 月 14 日～18 日, 緑色線: 北航, 赤色線: 南航

図 5.1 ポートルラジオの位置と周辺海域の船舶航跡<sup>(65)</sup>



図 5.2 ポートラジオの建物の周辺に通過する航空機

図 5.2 のように、本研究に協力したポートラジオは、近くの空港の滑走路と非常に近かった。四ヶ所の滑走路の中でポートラジオの建物と最も近い一つの滑走路は主に着陸に使われていたが、着陸する航空機がポートラジオの建物と非常に近接した状態で飛行を実施する。

天気がいい、航空機の着陸が多い場合には昼の時間の間、10 分ごとに着陸をしており、着陸時の航空機の騒音が事務室内でも非常に大きく響いた。

## 5.2 測定対象者

表 5.1 に示すように 8 人のオペレーターを対象に(男性 4 人、女性 4 人)測定し、8 人の中で 4 人は退勤後に運動をしていた。勤務経歴も 1 年から 10 年以上まで様々な範囲であった。

測定を実施したポートラジオは勤務体系が非常に多様だった。法令で定めている勤務時間を遵守する範囲内でオペレーターどうし自由に一ヶ月単位での勤務スケジュールを作成する形で、選択可能な勤務時間の種類は 10 種を超えた。

しかし、基本的には日勤者を除いた交代勤務者は昼に出勤して翌朝か昼に退勤した。夜間勤務中は交代で休み、休憩時間は午前 0 時前と午前 0 時以降に分けられた。

3 番オペレーターは測定期間の間、交代勤務ではない日勤勤務を続け、3 番オペレーターを除いた 7 人のオペレーターたちは(2 番オペレーターは支援勤務の形式として一度の日勤勤務遂行)夜間勤務を含めた交代勤務をした。



表 5.1 オペレーターの基本情報

*	年齢	勤務 経歴**	平均睡眠 時間	喫煙 (一日)	カフェイン 飲料(一日)	飲酒 (一か月)	汗が出るぐ らいの運動(一週)
1 F	34	12/7	7Hr 以上	×	3 杯以上	×	×
2 M	27	4/4	7Hr	0.5 箱	3 杯	2～4 回 (1～2 杯)	1～2 回
3 F	28	3/3	7Hr 以上	×	1 杯以下	2～4 回 (1～2 杯)	×
4 M	40	13/8	7Hr	×	1 杯	週 4 回以上 (3～4 杯)	1～2 回 ランニング
5 M	24	3/3	7Hr 以上	×	1 杯	1 回未満 (1～2 杯)	1～2 回 登山
6 F	24	1/1	7Hr	×	1 杯	×	×
7 M	31	12/2	4Hr 未満	2 箱	3 杯以上	×	×
8 F	28	6/4	7Hr 以上	×	3 杯以上	週 4 回以上 (3～4 杯)	1～2 回 フィットネス, ランニング

※ \*: オペレーター番号, \*\*: TST での全勤務期間/現在のポトラジオでの勤務期間(年)

M: Male, F: Female, ×: 該当無

### 5.3 測定方法

#### 5.3.1 機器

Silmee Bar type Lite を使用して心的負荷と関連した生体情報をリアルタイムで測定した。この機器は 64(幅)×28(奥行)×9.6(最厚部)mm(突起部除く)の非常に小型であり測定対象者の胸に付着して測定する。

Bluetooth を使用する無線機器で、一度の充電で 6 時間以上の測定が可能なのでオペレーターたちが仕事をしているところも妨害を与えずに自由に長時間の測定が可能である<sup>(66)</sup>。



図 5.3 Silmee Bar type Lite の外観とセンサー

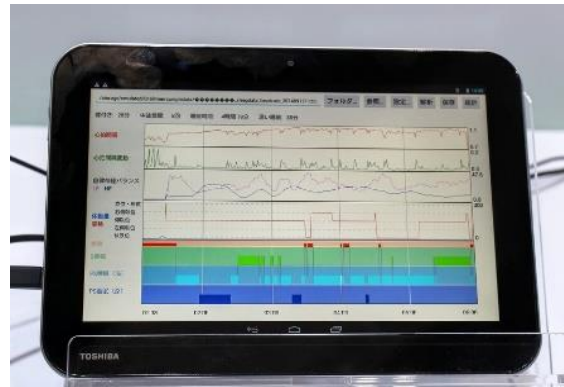


図 5.4 オンラインモード測定画面

同時に 2 人から 3 人のオペレーターらを測定した。測定中の休憩などの理由でオペレーターが事務室を離れる場合や、機器の放電により他の機器に交換しなければならない場合もあるが、基本的には測定期間中に常に事務室に在室し、Bluetooth 接続が可能な範囲内でオペレーターの当時の勤務活動について観察・記録した。

### 5.3.2 アンケート

オペレーターの交代勤務耐性を測定するために生体情報測定だけでなく個別アンケートも行った。アンケートは勤務開始後、毎 30 分ごとの勤務の種類(港務通信、動静把握、情報収集の中から選択)や、オペレーターたちの基本的な身体情報や生活習慣に関する質問、普段身体へのストレスと疲労に関連された状態に対する質問である。そして、交代勤務耐性のアンケートと交代勤務耐性に影響を与えるアンケートを実施(勤務をしないときに記入)した。

アンケートは、Seo, Yeon-ok と Kim, Souk Young の論文<sup>(34)</sup>(2016)で看護師らの交代勤務耐性を測定する方式を準用した。交代勤務耐性を評価する 5 種類の質問と交代勤務耐性に影響を及ぼす追加要素の 4 種類の質問にアンケートを実施した。

#### (1) 交代勤務耐性

##### ① 不眠症

Pallesen など(2008)が開発した The Bergen Insomnia Scale (BIS)を使用した。このアンケート 6 問に 8 点の尺度で、一週間中、各質問項目に該当する日数を表記する形式である。このアンケートから 1-4 番質問は夜間勤務の不眠症、5-6 番質問は昼間勤務の不眠症に関する質問だが、夜間勤務質問のうち一つが 3 点以上であるか、昼間勤務質問のうち一つが 3 点以上の場合に不眠症が存在するものと見做す。

##### ② 睡眠障害

Johns M.W(1991)が開発した Epworth Sleepiness Scale (ESS)のアンケートとして測定した。このアンケートは 8 種類の日常的な状況でどのくらい眠いかを 0-3 点の尺度で答えるアンケートとして 11 点を超えると、睡眠障害に該当するものと見做す。

##### ③ 慢性疲労

Chalder など(1993)が開発した Fatigue Questionnaire (FQ)を使用した。このアンケートはこの一ヵ月間、経験した疲労感を 11 つの質問を通じて測定するもので 4 点の尺度である。4 点以上になると慢性疲労を持っているものと見做す。

##### ④ 不安と憂鬱

Zigmond と Snaith(1983)が開発した The Hospital Anxiety and Depression Scale(HADS)を使用した。全体 14 質問項目、4 点の尺度で 7 質問項目は不安、7 質問項目は憂鬱を測定する。警戒点は 8 点で、点数が高いほど不安と憂鬱が高いことを意味する。

## (2) 交代勤務耐性に影響を及ぼす追加要素

### ① 強靱性

強靱性はストレス的な生活の事件に直面した際の一つの抵抗資源として機能する個人的な特性として、本研究では Bartone (1989) が開発した Dispositional Hardiness scale-Revised (DRS-15-R) をアンケートに使用した。このアンケートは 15 質問項目に 4 点の尺度で、点数が高いほど強靱性が高いということを意味する。

### ② 睡眠覚醒

睡眠覚醒周期は、Torsvall と Åkerstedt (1980) が開発した Diurnal Scale (DS) を使用した。このアンケートは睡眠・覚醒の周期(朝型/夜型人間)を測定するアンケートとして 7 質問項目に 4 点の尺度で、2 番、3 番、5 番は逆質問項目で構成されている。

朝型人間は早く寝て早く起き、寝る時間が夜型人間より長く、夜型人間は遅く寝て遅く起きる睡眠習慣を意味する。 点数が高いほど早起きする朝型人間を意味する。

### ③ 睡眠習慣の柔軟性と無力感

柔軟性と無力感は Di Milia, Smith と Folkard (2005) が開発した Circadian type inventory (CTI) を使用した。CTI は毎日寝て起きて行動する習慣と好感度についた計 11 質問項目で行われており、5 質問項目は睡眠習慣の柔軟性(Flexibility)、6 質問項目は無力感(Languidity)を測定し、各質問項目は 5 点の尺度である。

柔軟性は点数が高いほど不規則な時間にも睡眠を取ることができ、睡眠欲求が少なく、敏捷さ(Folkard, Monk & Lobuan, 1979)を意味して点数が低ければ柔軟性が低く、硬直されていることを意味する。無力感は点数が高いほど眠気に耐えられず、睡眠を少なく取った時に眠気をよく感じることを意味し、点数が低いと活力があることを意味する。

## 5.4 導き出されたデータ

### ・Silme Bar type Lite

オペレーターに機器を取り付けてリアルタイムでデータを測定・記録するオンラインモードで測定をすると、図 5.5 のように画面には心拍数と加速度、皮膚温度など機器のセンサーで測定している基本的なデータが表示される。

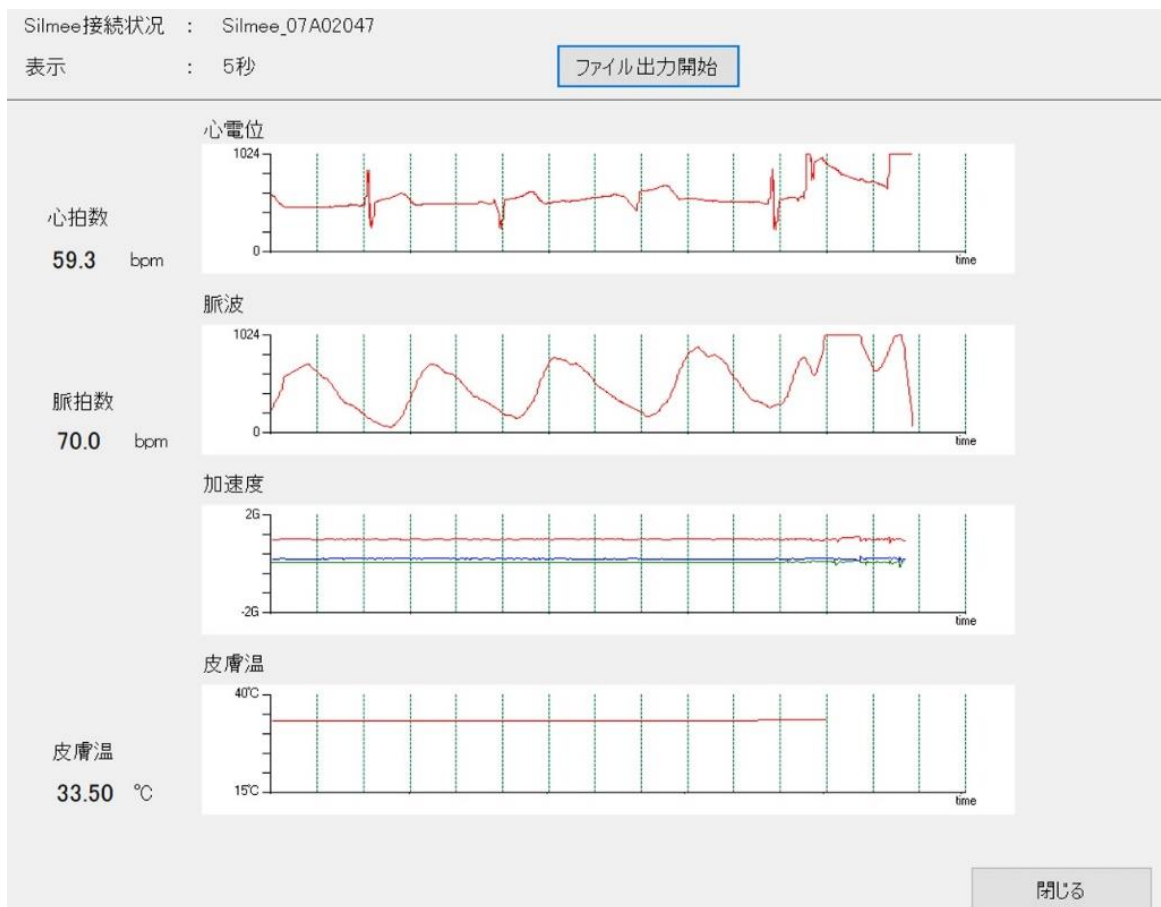


図 5.5 オンライン計測画面<sup>(66)</sup>

途中で放電して機器を交換する前に、その時まで測定されたデータを保存すれば、図 5.6 のように記録されたデータが自動的に分析される。

保存される 9 種類のデータの中から RRI の変動や LF/HF 数値などのような基本的な身体状態の変化を解析できる指標がグラフで表示される。



図 5.6 自律神経・睡眠解析結果画面<sup>(66)</sup>

分析データを保存すると、計 9 種類のファイルが図 5.7 のように個別的に CSV ファイルの形式で保存される。



図 5.7 計測データの CSV ファイル出力例<sup>(66)</sup>

データファイルの種類は心電位/心拍 R-R 間隔/脈波/脈波 P-P 間隔/加速度/体動量/姿勢/皮膚温である<sup>(66)</sup>。図 5.8 のように CSV ファイルは時系列と周波数系列のデータが全て表示される。

本研究では、このように基本的に記録されたデータをそのまま使用することもあったが、記録されたデータを活用して追加的な指標のデータに変換して使用することもあった。(例:LF と HF のデータを利用して TP のデータを求め、TP と RRI のデータを利用して CCVTP のデータを求める方式)

		時間軸自律神経指標					周波数軸自律神経指標					体動量	睡眠ステージ	姿勢	向き
日付	時刻	心拍数 [bpm]	心拍数標準偏差 [bpm]	心拍間隔 [msec]	心拍間隔標準偏差 [msec]	r-MSSD [msec]	pNN50 [%]	振幅	LF [msec]	HF [msec]	LF/HF				
9	2014/7/2 0:33	64.897	2.333604	925	33	0.02444	1.5385	506	17.305	19.817	0.9131	4 W		0	0
10	2014/7/2 0:34	58.506	3.590995	1029	58	0.03187	10.345	512	18.778	19.672	0.9862	0 W		0	0
11	2014/7/2 0:35	57.473	1.436574	1044	26	0.02737	3.5088	486	19.449	21.117	0.9536	0 W		0	0
12	2014/7/2 0:36	56.234	1.101065	1067	20	0.02645	3.5088	539	17.957	23.526	0.8438	0 W		0	0
13	2014/7/2 0:37	55.936	1.211768	1073	23	0.03296	3.6364	518	17.411	24.069	0.7972	0 W		0	0
14	2014/7/2 0:38	55.239	1.058688	1086	20	0.02808	5.3571	556	17.616	23.749	0.8083	0 W		0	0
15	2014/7/2 0:39	54.227	1.561351	1107	31	0.04019	18.519	491	17.711	24.69	0.7822	0 W		0	0
16	2014/7/2 0:40	53.945	1.48103	1113	30	0.0379	20.37	543	18.515	25.487	0.7828	0 W		0	0
17	2014/7/2 0:41	53.413	1.751035	1124	36	0.04617	32.075	554	18.125	25.636	0.7593	0 PS1		0	0
18	2014/7/2 0:42	53.707	2.282518	1119	45	0.03858	24.074	524	17.629	26.204	0.703	0 PS1		0	0
19	2014/7/2 0:43	52.731	1.362625	1138	29	0.03771	13.462	495	23.041	25.841	1.0234	0 PS1		0	0
20	2014/7/2 0:44	53.271	2.508227	1128	51	0.04469	33.333	538	25.233	26.236	1.0948	0 PS1		0	0
21	2014/7/2 0:45	53.17	1.86743	1129	38	0.04598	35.849	545	24.701	27.133	1.0394	0 PS1		0	0
22	2014/7/2 0:46	52.925	2.009749	1135	40	0.03924	22.642	520	25.254	26.571	1.0884	0 PS1		0	0
23	2014/7/2 0:47	53.587	2.335497	1121	47	0.0378	18.868	548	24.962	26.03	1.084	0 PS1		0	0

1: 立位・座位  
0: 臥位

0: 仰臥位  
1: 伏臥位  
2: 左側臥位  
3: 右側臥位

図 5.8 自律神経・睡眠解析結果ファイル出力<sup>(66)</sup>

## 5.5 結語

本章では交代勤務耐性の測定のためのアンケートと生体情報収集について調べた。生体情報を収集する機器である Silmee Bar type Lite は、一度の充電で 6 時間以上の測定が可能で、一度に 2-3 人のオペレーターを交代で測定した。

アンケートは、単に 8 人に対する個別の測定として、実際に受けている疲労やストレスと個人が自ら自覚する疲労とストレスの程度には差があるだけに、決定的な資料としてではなく、生体情報との比較による自覚部分と、実際の心的負荷との比較の資料として活用した。

## 第6章 分析

8人のオペレーターから測定された生体情報とアンケート結果について分析し、交代勤務耐性が相対的に高い人とそうでない人を区分する。

また、交代勤務耐性に影響を与える要因を分析するために、生体情報データとアンケート結果を比較する。

### 6.1 各オペレーターの生体データの平均

表6.1は測定対象者8名から得られた生体データの平均値である。自律神経の全体量を示すTPを見ると、勤務経歴や年齢が相対的に高い1、4、7番オペレーターは低く出ており、相対的に勤務経歴が短く、年齢が若い2、6、8番オペレーターは数値が高かった。

表 6.1 オペレーター8人の全体指標の平均値

* /	1 F	2 M	3 F	4 M	5 M	6 F	7 M	8 F	平均
体格指数[BMI]	21.48	20.90	17.44	18.04	20.94	20.96	36.75	18.82	21.92
心拍数[bpm]	86.70	77.76	84.99	91.29	84.56	84.98	97.69	75.39	85.42
心拍間隔[ms]	697.51	793.35	714.07	677.59	725.63	724.70	628.70	820.13	722.71
LF [ms <sup>2</sup> ]	35.17	72.98	52.16	42.52	55.97	57.49	37.62	81.50	54.43
HF [ms <sup>2</sup> ]	8.14	23.05	12.29	10.01	19.92	18.77	15.45	33.86	17.69
LF/HF	5.88	4.82	5.78	6.08	3.73	4.83	4.79	3.60	4.94
TP [ms <sup>2</sup> ]	43.30	96.02	64.46	52.54	75.89	76.26	53.07	115.36	72.11
CCVTP [%]	0.92	1.20	1.10	1.05	1.18	1.14	1.00	1.23	1.10
CCV HF [%]	0.39	0.56	0.47	0.45	0.59	0.53	0.48	0.64	0.51
LFnu [%]	79.79	76.22	80.07	80.10	72.74	75.71	76.51	72.01	76.65
HFnu [%]	20.21	23.78	19.93	19.90	27.26	24.29	23.49	27.99	23.35
lnLF	3.41	4.12	3.83	3.62	3.90	3.83	3.24	4.15	3.76
lnHF	1.90	2.82	2.31	2.08	2.82	2.55	1.93	3.11	2.44
lnLF/lnHF [%]	2.06	1.55	1.80	1.76	1.45	1.65	1.65	1.42	1.67
SDNN[ms]	39.76	96.74	55.83	84.78	94.75	76.74	84.26	120.83	81.71
CVRR [%]	5.70	12.35	7.79	12.86	13.07	10.37	13.29	14.70	11.27
pNN50 [%]	4.04	25.76	13.43	5.82	15.21	18.39	9.18	27.83	14.96
r-MSSD [ms]	0.03	0.10	0.04	0.10	0.11	0.07	0.11	0.15	0.09

※ \*: オペレーター番号



- (1) ストレス指標である LF/HF を見ると 1、3、4 番オペレーターは 5 以上である一方に 5、8 番オペレーターは 4 以下の数値を見せている。そして数値の減少が疲れを示唆する TP 値の場合には 1、4、7 番オペレーターは 60 以下の数値である一方に 2、8 番オペレーターは 90 以上の高い数値を示している。
- (2) 副交感神経の指標である HF の場合にも 1、3、4 番オペレーターは低い数値を、2、5、8 番オペレーターは高い数値を示している。心拍変動性を確認する最も簡単な指標である
- (3) SDNN の数値でも 2、5、8 番オペレーターは 90 以上の高い数値を示す反面、1、3 番オペレーターは 60 以下の低い数値を示している。
- (4) 心拍変動性を示唆する CCVTP とストレスに対する回復力を表す CCVHF も 2、5、8 番オペレーターは高い数値を、1、4、7 番オペレーターは低い数値を記録した。
- (5) 迷走神経の活動性を示す CVRR の数値は 5、7、8 番オペレーターが高く、1、3、6 番オペレーターが低かった。
- (6) そして本研究の主題といえる交代勤務耐性と関連した迷走神経の緊張度を示唆する pNN50 の場合には 2、6、8 番オペレーターが高く、1、4、7 番オペレーターが低く現れており、rMSSD は 5、7、8 番オペレーターが高く、1、3、6 番オペレーターが低かった。lnHF は 2、5、8 番オペレーターが高く、1、4、7 番オペレーターが低かった。

以上のことから、1 番オペレーターの数値はすべての指標で否定的な順位 3 位内に該当し、逆に 8 番オペレーターの数値はすべての指標から肯定的な順位 3 位内に該当するということが分かった。本研究では 1 番オペレーターと 8 番オペレーターを交代勤務耐性の高い人と低い人両者の対照群として解釈した。そして 2 番と 5 番オペレーターも代替的な数値がストレスと疲労、交代勤務耐性の指標で他のオペレーターたちよりもっと小さな損失を受けていることが分かった。一方、3 番と 4 番オペレーターは、相対的にもっと多くの損失を受けていることが分かった。

6 番オペレーターは交感神経と全体自律神経の活性度では高い数値を見せたが、内在活力と心拍変動を示す SDNN、迷走神経活動度を示す CVRR の数値は低く出た。また、目立つ点は迷走神経の緊張の大きさを表わす pNN50 は高く出たのに対して、同じ短期的な迷走神経緊張の大きさを表わす rMSSD は数値が低かった。

7 番オペレーターの場合は 6 番オペレーターとは反対により全体的な自律活動量を示唆する TP と LF の数値が低く、代替的を否定的な数値を見せてくれるが、迷走神経活動度を示す CVRR の数値は高く、ストレス数値は低く出ており、6 番オペレーターとは逆に pNN50 は低く rMSSD は高く出た。

平均値で分析した結果として 8 人のオペレーターの中で交代勤務耐性が相対的に高いと見られるオペレーターは 2、5、8 番オペレーターであり、相対的に低いと見られるオペレーターは 1、3、4 番オペレーターだった。

## 6.2 各時間帯別のストレスや疲労度

表 6.2 は 8 人のオペレーターの各時間帯別の平均値を示す。ストレスを最も多く受ける時間帯は 05 時から 09 時の間であり、最も疲労を多く受ける時間帯は 12 時から 17 時の間であることを知ることが分かった。

TP の減少は疲労の増加を意味するため、測定者が観察したラッシュアワー(朝 7 時頃)が存在する朝に受けたストレスの損失が午後になって現れると解釈できる。心拍数は朝から上昇し続け、深夜の時間に低くなることが分かる。

表 6.2 勤務時間帯別の平均値

時間帯	心拍数(bpm)	ストレス(LF/HF)	疲労(TP, ms <sup>2</sup> )
0900～1200	81.1	5.37	72.94
1200～1700	88.4	5.40	59.54
1700～2300	89.1	4.57	77.66
2300～0500	78.5	5.40	68.83
0500～0900	81.7	5.67	71.00

## 6.3 各業務別のストレスや疲労度

表 6.3 は 8 人のオペレーターのそれぞれの業務の種類別の数値を示す。数値の差は小さいが、最もストレスと疲労は受ける業務は情報収集ということを示している。2 番と 8 番オペレーターは SNS(LF /HF)数値は低い反面、TP の数値は 98 以上の高かった。

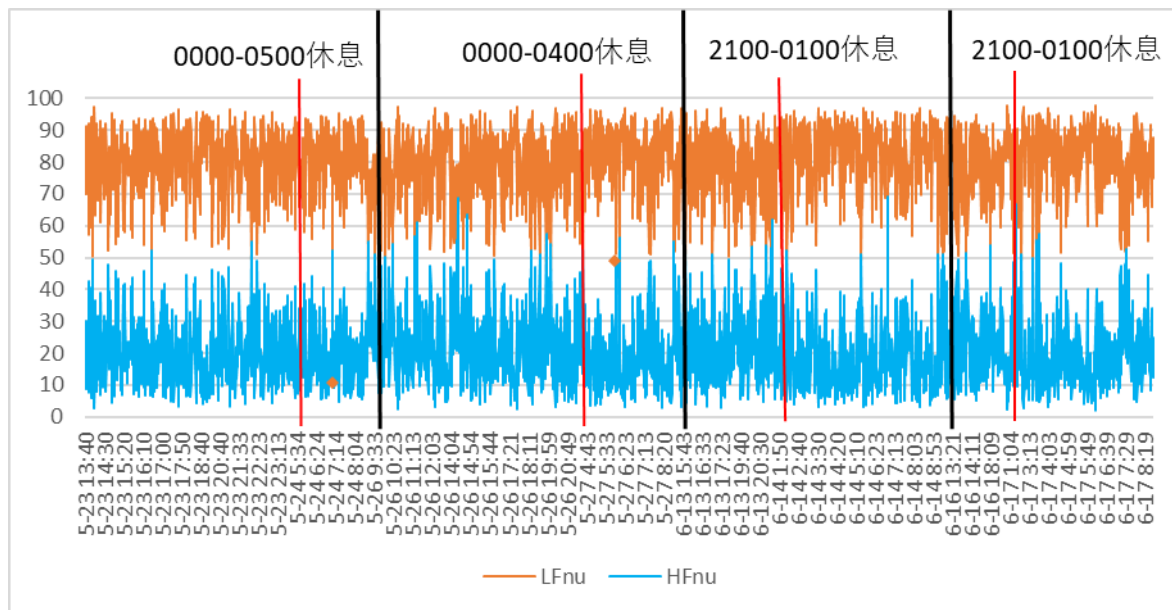
表 6.3 業務種類別の平均値

*	港務通信		動静把握		情報収集	
	ストレス (LF/HF)	疲労 (TP, ms <sup>2</sup> )	ストレス (LF/HF)	疲労 (TP, ms <sup>2</sup> )	ストレス (LF/HF)	疲労 (TP, ms <sup>2</sup> )
1	6.36	44.13	5.84	43.79	5.51	42.05
2	4.51	110.17	4.74	98.02	4.60	102.19
3	5.30	67.84	5.77	67.03	5.86	51.07
4	6.42	52.37	5.89	51.08	5.66	54.19
5	3.13	72.23	3.90	77.50	4.17	77.31
6	6.06	56.74	4.18	96.24	5.55	54.25
7	4.38	46.17	4.42	50.53	5.88	37.06
8	3.46	130.74	3.70	98.84	3.67	105.56
平均	4.95	72.55	4.81	72.88	5.11	65.46

※ \*: オペレーター番号

## 6.4 出勤から退勤までのストレスと疲労の変動

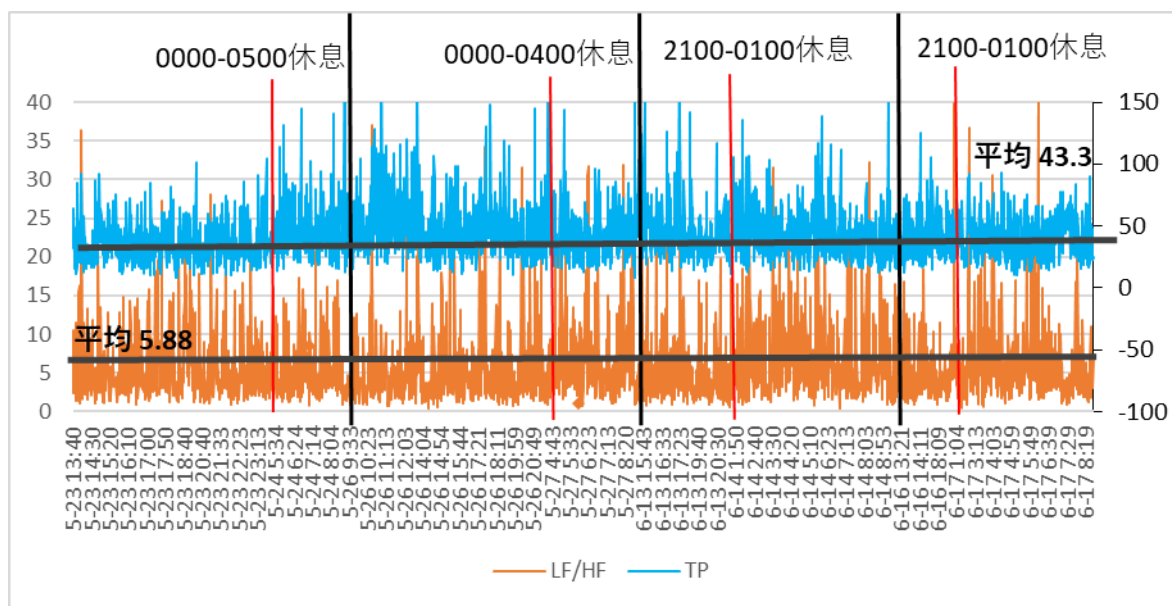
一日周期リズムの確認のために LFnu と HFnu の割合を使用した。グラフは 100%内で LFnu と HFnu が占める割合を示している。LFnu は交感神経優位を HFnu は副交感神経の優位を示唆する。図 6.1 は 1 番オペレーターの 4 回の交代勤務での様相を表す、全体的に出勤時には副交感神経の優位を、退社間際には交感神経の優位を示し、退勤間際には再び副交感神経が優位を見せているということが分かった。また、休憩をしてすぐ副交感神経が活性化されるのではなく、時間が経って朝 7 時頃に優位になるということが分かった。



※ 縦軸単位：%

図 6.1 オペレーター1 番の日周期リズム

図 6.2 に示すように 1 番オペレーターの場合、TP の平均値は低く、LF/HF の平均値は高かった。TP の変動は一定ではなく、LF/HF が急激に上昇する場合が多かった。



※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP (ms<sup>2</sup>), 横軸: 測定時刻

図 6.2 オペレーター1 番のストレスと疲労の変動

表 6.4 は 1 番オペレーターの 4 回の交代勤務での出勤と退勤の時の数値を示している。ストレスの場合、真夜中以降に休息を取る場合、継続される交代勤務で退勤時のストレスが増加した反面、真夜中 12 時以前に休息を取った場合、退勤の時のストレスが減少した。

しかし、疲労は確実に真夜中 12 時以前に休息を取った場合が TP の損失が大きく、退勤の時にもっと大きな疲労を現わすということがわかった。

表 6.4 オペレーター1 番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

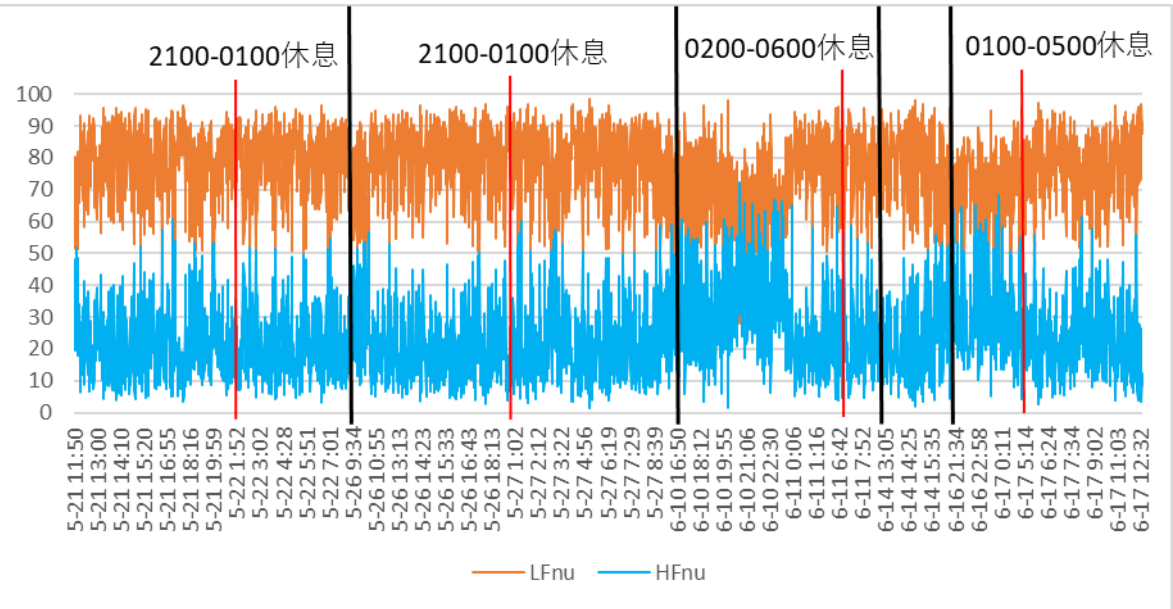
	HR	SNS	TP	2 日 休	HR	SNS	TP	HR	SNS	TP	2 日 休	HR	SNS	TP	
出	95.7	6.34	37.2		94.9	3.58	38.8	84.7	4.53	60.6		88.3	4.87	39.9	
	19.5 時間勤務				24 時間勤務			19.5 時間勤務				24 時間勤務			
退	86.0	5.24	53.3		89.0	8.21	47.2	90.8	8.30	36.4		91.5	5.16	37.7	

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP: ms<sup>2</sup>

図 6.3 は 2 番オペレーターの日周期リズムを示している。概略的に出勤時と退社直前、休憩直後に副交感神経の優位を示し、昼間には交感神経が優位を示した。

1 番オペレーターより副交感領域の数値が高いと解釈できる。また、3 番目と 4 番目の勤務で 21 時頃に副交感領域の活性化を観察することができる。

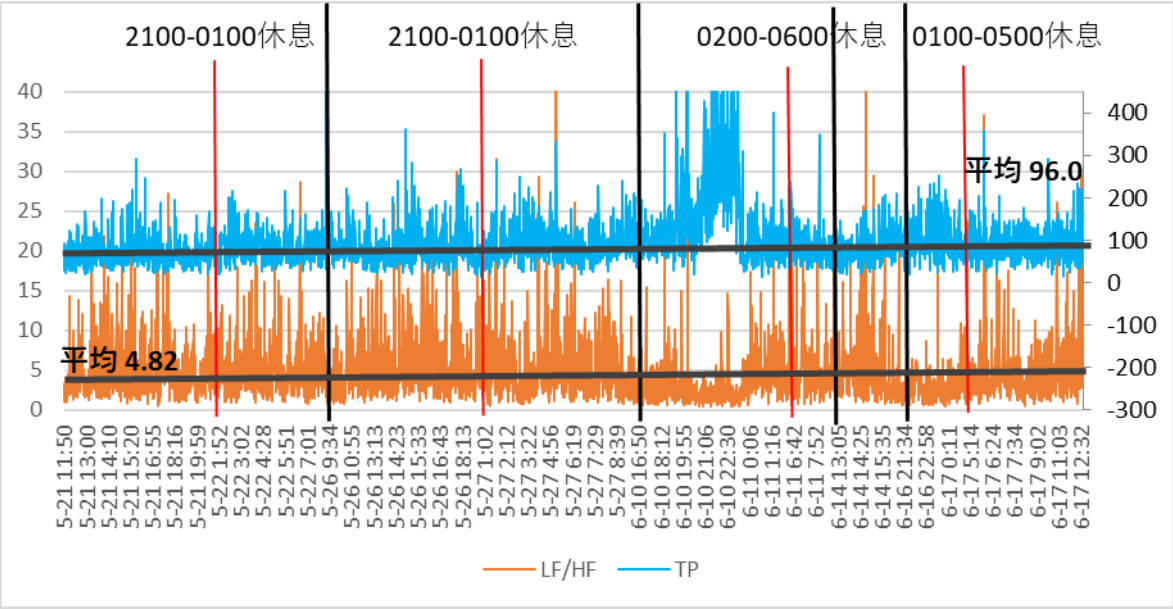
一度の日勤勤務では副交感領域がだんだん拡張していくのが観察できる。



※ 縦軸単位: %

図 6.3 オペレーター2 番の日周期リズム

図 6.4 に示すように 2 番オペレーターの場合、TP の平均値が高く、変動幅が狭い。LF/HF の平均値は低く、変動幅が広い。これは TP の上昇を LF が主導していると解釈できる。



※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP (ms<sup>2</sup>), 横軸: 測定時刻

図 6.4 オペレーター2 番のストレスと疲労の変動

表 6.5 は 2 番オペレーターの 4 回の交代勤務と 1 回の日勤勤務での数値を示している。まず、日勤勤務後の退勤時の心拍数とストレス数値は確かに交代勤務より低い。

しかし、TP の損失は交代勤務より大きかった。全体勤務で出勤時より退勤時の方の心拍数が低く、ストレスはさらに高かった。しかし、TP はさらに高くなる場合もあった。

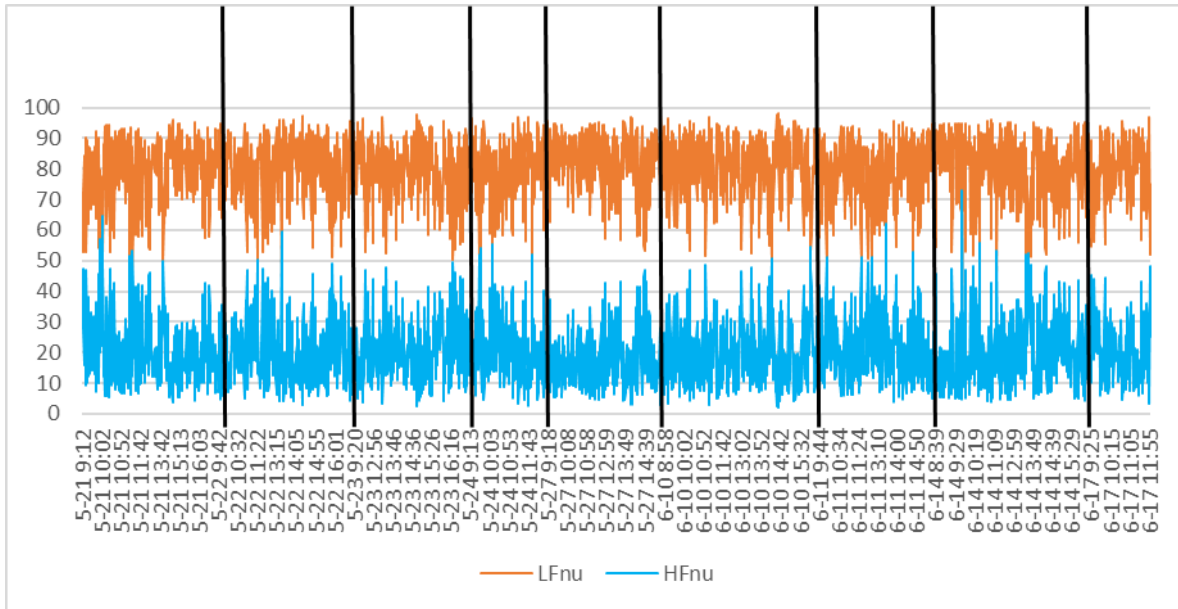
夜 12 時以前に休んだ場合には、連続する勤務で退勤時のストレスの変化がなかったが、夜 12 時以降に休んだ場合は連続する勤務でストレスが増加することが確認できる。

表 6.5 オペレーター2 番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

	HR	SNS	TP	4 日 休	HR	SNS	TP	HR	SNS	TP	3 日 休	HR	SNS	TP
出	92.8	3.79	62.1		93.0	2.48	84.1	88.8	3.30	121.9		85.1	4.37	68.7
	21 時間勤務				24 時間勤務		21 時間勤務			8 時間勤務(日勤)				
退	70.7	5.76	119.2		71.6	5.41	100.3	73.4	5.54	81.1		67.9	4.87	83.7
出	90.9	2.59	99.4											
	21 時間勤務													
退	75.6	7.96	124.2											

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP: ms<sup>2</sup>

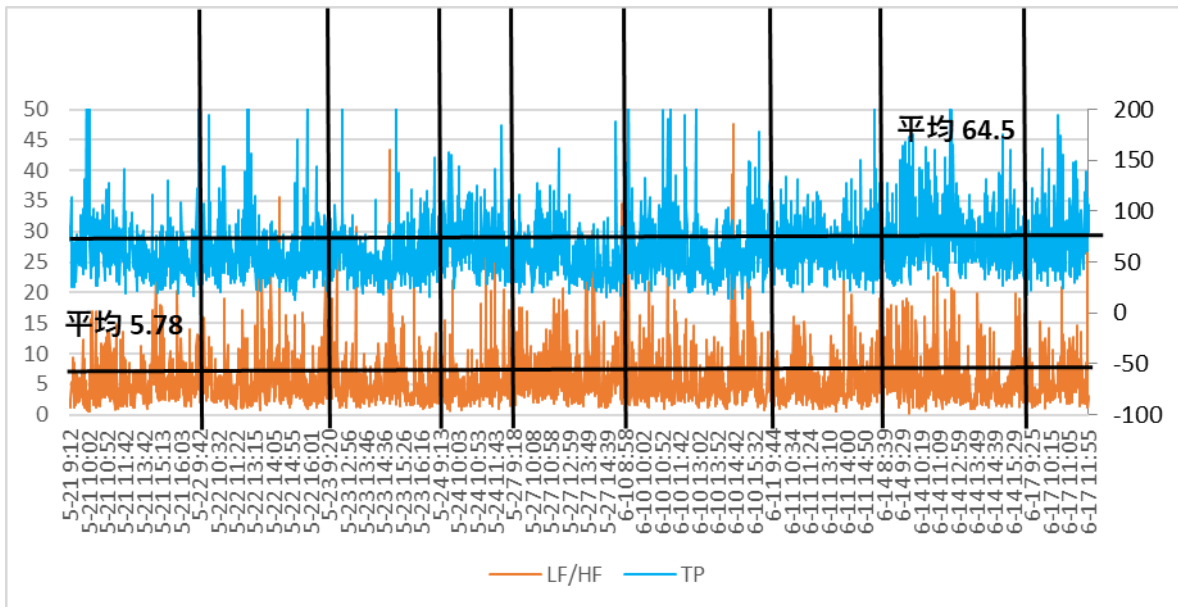
図 6.5 は 3 番オペレーターの日周期リズムを見せてくれる。5 月 21 日から 24 日までの連続した勤務では出勤時に副交感神経が優位を示し、次第に交感神経が優位を見せた。月曜日の 5 月 27 日と 6 月 10 日、6 月 17 日は出勤時にも交感神経の優位を示した。交感領域と副交感領域の変化が勤務によって不規則であることを観察できる。



※ 縦軸単位: %

図 6.5 オペレーター3 番の日周期リズム

図 6.6 に示すように 3 番オペレーターの場合、TP 平均値は中程度で、LF/HF の平均値が高い。退勤に近づくほど TP が減少する場合がある。



※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP (ms²), 横軸: 測定時刻

図 6.6 オペレーター3 番のストレスと疲労の変動

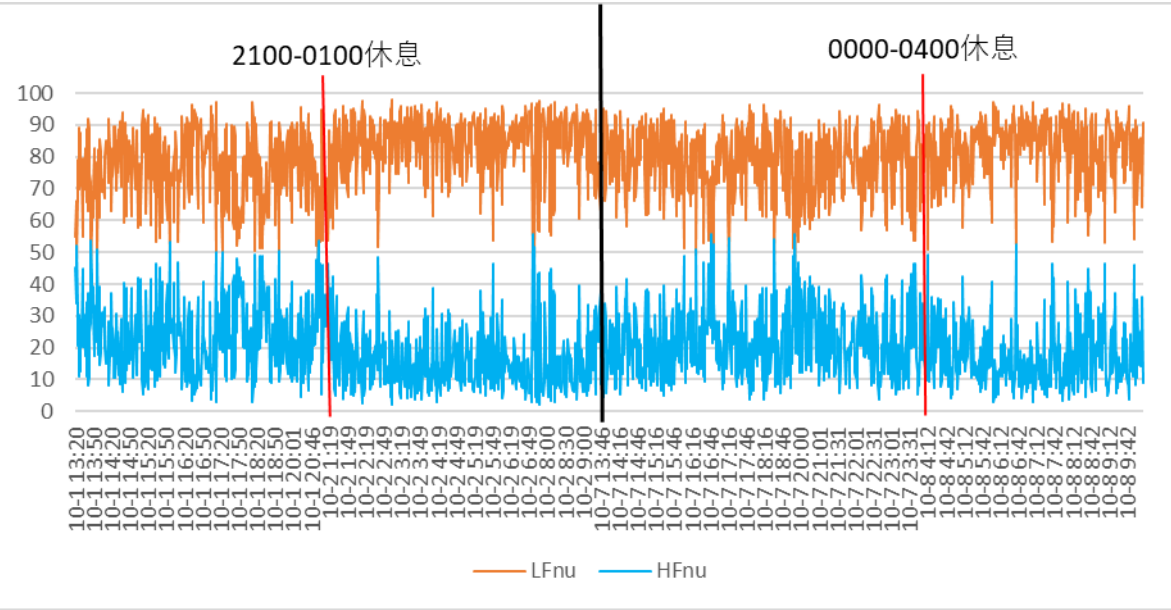
表 6.6 は 3 番オペレーターの 9 回の日勤勤務での数値である。5 月 21 日から 5 月 24 日までの連続する日勤勤務で出勤時のストレスは増加傾向を示しているが、疲労は 5 月 22 日に増加したが、再び減少する傾向を見せてくれる。退勤時には 5 月 22 日にストレスは減少し、以降は再び増加しており、疲労は 5 月 21 日に高くしていたが、以後に低くなった。ここでストレスは連続勤務時に増加する傾向を、疲労は減少する傾向を見せた。5 月 27 日と 6 月 10 日は週末休息後、月曜日で出勤時と退勤時のストレスと疲労の数値が高いということが分かった。ただ、月曜日の 6 月 17 日は出勤時のストレスと疲労の数値は高かったが、退勤時には数値が低かった。6 月 14 日は金曜日として出勤時より退勤時がストレスと疲労の数値が低かった(5 月 24 日も金曜日だが、午前勤務の後に午後は研修をして除外)。

表 6.6 オペレーター3 番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

	HR	SNS	TP	HR	SNS	TP	HR	SNS	TP	HR	SNS	TP	HR	SNS	TP
出	85.4	3.96	59.7	81.1	4.50	49.2	87.8	6.44	62.0	86.5	5.65	69.6	94.2	6.03	57.8
	7 時間勤務(日)			7 時間勤務(日)			7 時間勤務(日)			4 時間勤務(日)			7 時間勤務(日)		
退	87.0	6.0	51.9	85.7	3.59	67.3	87.2	4.61	63.0	87.3	7.41	67.6	98.2	7.82	48.4
出	80.5	5.27	57.4	82.6	4.31	75.6	83.3	7.46	66.8	84.8	6.73	58.0			
	7 時間勤務(日)			7 時間勤務(日)			7 時間勤務(日)			7 時間勤務(日)					
退	86.3	7.68	63.9	79.4	7.49	80.3	79.4	4.14	72.9	79.5	2.24	96.8			

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP: ms<sup>2</sup>

図 6.7 は 4 番オペレーターの日周期リズムを表す。出勤時と休息直前、退勤直前には副交感神経の優位を、休息後と昼間、退勤時には交感神経の優位を示した。

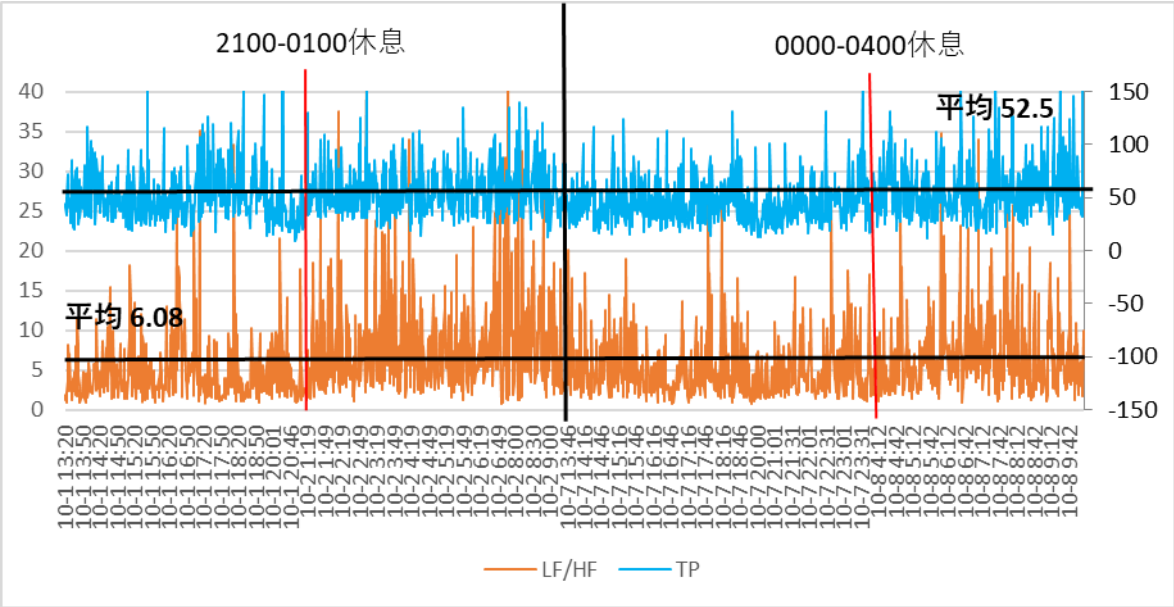


※ 縦軸単位: %

図 6.7 オペレーター4 番の日周期リズム



図 6.8 に示すように 4 番オペレーターの場合、TP の平均値は低く、LF/HF の平均値は高い。LF/HF の変動幅が広く急激な上昇を見せる。休憩後に LF が上昇した。



※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP ( $\text{ms}^2$ ), 横軸: 測定時刻

図 6.8 オペレーター4 番のストレスと疲労の変動

表 6.7 は 4 番オペレーターの 2 回の交代勤務数値である。確かに夜 12 時以降に休んだ場合、退勤時のストレスと疲労の数値が低かった。

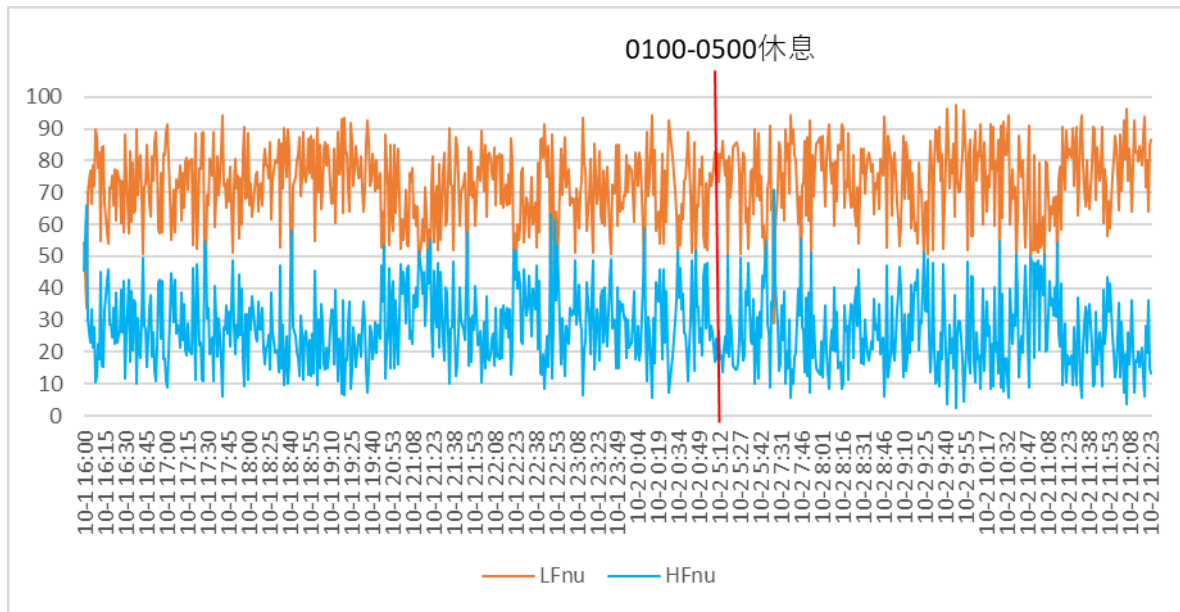
また、夜 12 時以前に休んだ場合、休んだ後にストレス数値が夜 12 時以降に休んだ場合より高く、夜 12 時以降に休んだ場合には、退勤時間に近づくほど TP が増加する傾向を表す。ラッシュアワーの 7 時頃にはストレス数値と TP の数値が全て上昇する傾向を見せたが、この場合、HF より LF の上昇がもっと大きいと解釈できる。

表 6.7 オペレーター4 番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

	HR	SNS	TP	HR	SNS	TP
出	93.6	3.49	46.4	100.7	5.31	47.8
	19.5 時間勤務			19.5 時間勤務		
退	79.8	8.80	57.7	83.6	5.96	91.0

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP:  $\text{ms}^2$

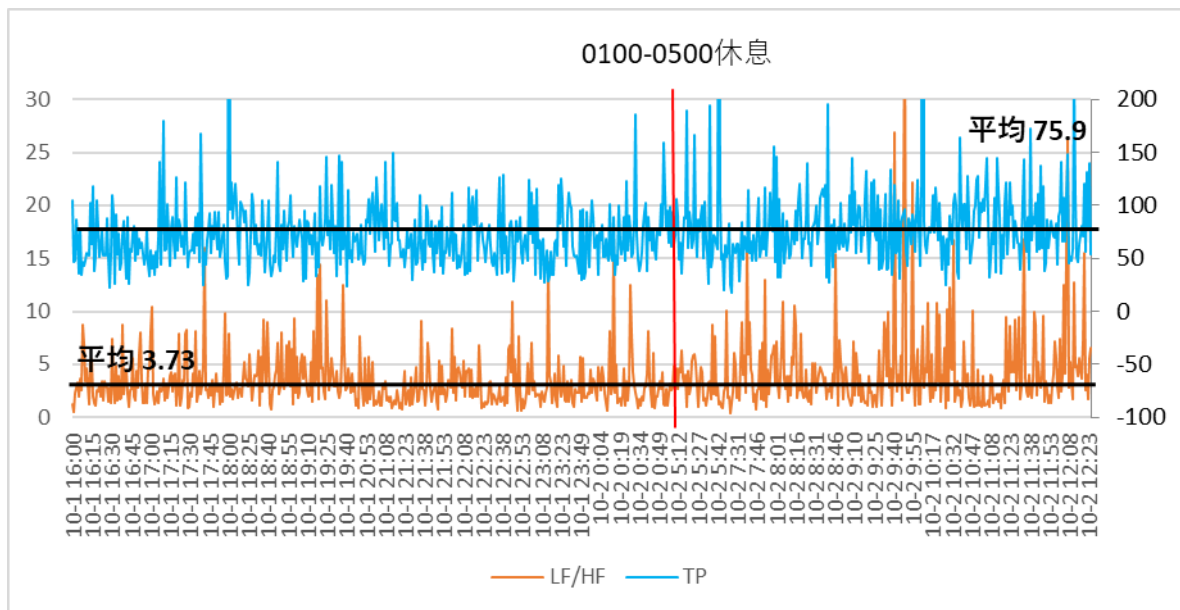
図 6.9 は 5 番オペレーターの日周期リズムを表す。出勤時と休息前、夜間は副交感神経の優位を示し、昼間は交感神経の優位を示したが、お互いの変動性が大きかったため、大体バランス良い様相を表した。変動の幅は広いが、副交感領域の数値が高いと解釈できる。



※ 縦軸単位: %

図 6.9 オペレーター5 番の日周期リズム

図 6.10 に示すように 5 番オペレーターの場合、TP の平均値は高く、LF/HF の平均値は非常に低い。両者の変動幅が狭く、LF/HF が急激に上昇する場合に TP の上昇が続く。これは TP の上昇を LF が主導すると解釈できる。



※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP (ms<sup>2</sup>), 横軸: 測定時刻

図 6.10 オペレーター5 番のストレスと疲労の変動

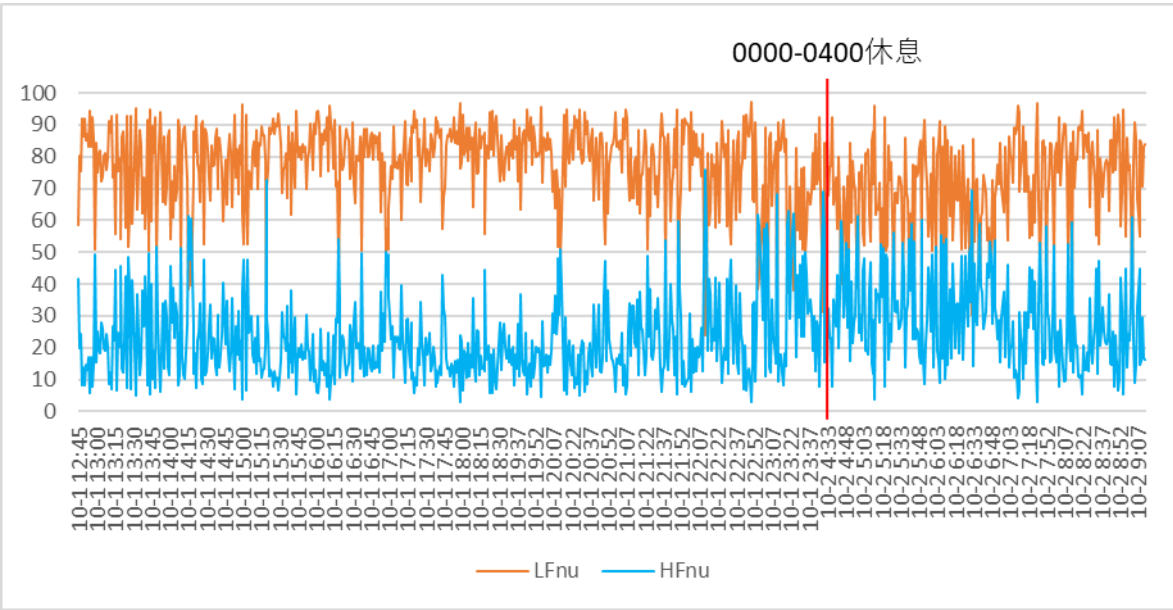
表 6.8 はオペレーター5 番の 1 回の交代勤務数値を示している。出勤時より退勤時にストレス数値が高くなったが、TP の損失は減ったことがわかる。また、夜 12 時以降の休息後の即刻の TP の上昇を表したが、そして勤務交代が行われる午前 9 時頃に急激なストレス数値の増加を確認することができる。ラッシュアワーの 7 時頃より勤務引継時間の 9 時頃にストレス数値の急激な増加を見せた。また、9 時ごろのストレス数値の増加が TP の増加より大きいので、4 番オペレーターのように HF より LF の上昇がより大きいということを確認することができる。

表 6.8 オペレーター5 番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

	HR	SNS	TP
出	95.0	3.10	63.7
21 時間勤務			
退	73.4	5.77	85.2

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP: ms<sup>2</sup>

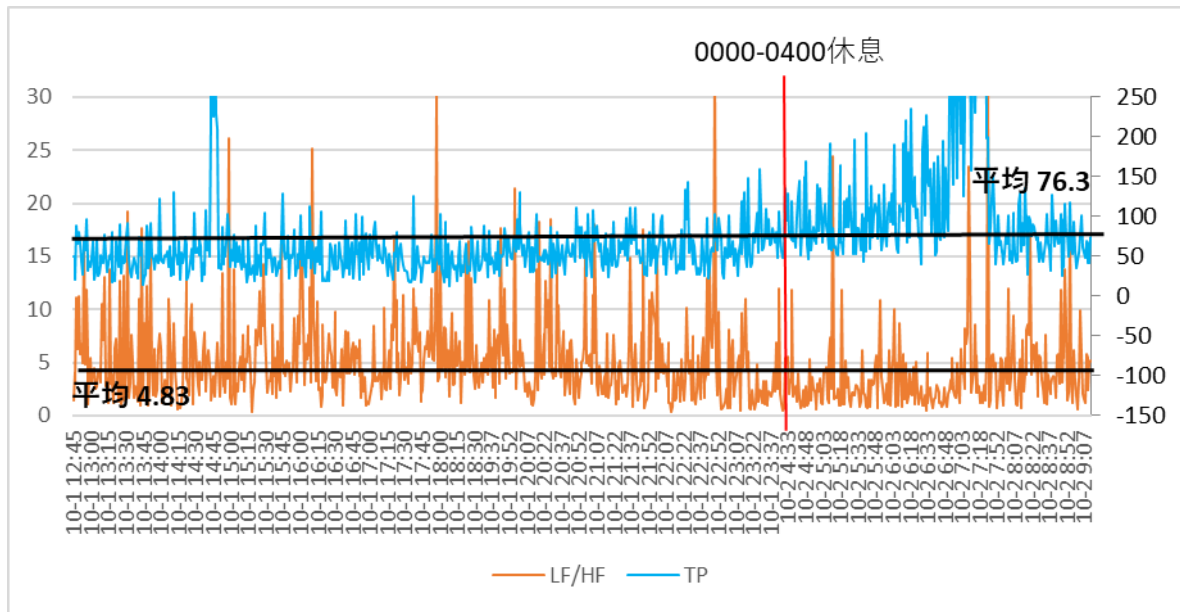
図 6.11 は 6 番オペレーターの日周期リズムを表す。出勤時と夜間、休息前後、退勤直前では副交感神経の優位を示し、昼間には交感神経の優位を見せた。休息後にすぐ副交感領域の増加を確認できる。また、全体的に副交感領域が優位を示していると解釈できる。



※ 縦軸単位: %

図 6.11 オペレーター6 番の日周期リズム

図 6.12 に示すように 6 番オペレーターの場合、TP の平均値が高く、LF/HF の平均値が低い。両者の変動幅が狭く、5 番オペレーターと同様に LF/HF が急激に上昇する際に TP も上昇する。しかし、5 番オペレーターと違って TP の上昇幅が非常に広い。これは LF の上昇より HF の上昇の方が高いと解釈できる。



※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP (ms<sup>2</sup>), 横軸: 測定時刻

図 6.12 オペレーター6 番のストレスと疲労の変動

表 6.9 は 6 番オペレーターの 1 回の交代勤務数値を示している。出勤時より退勤時にストレスや疲労の数値が減少したということを知ることができ、真夜中以降の休息後に朝 7 時ごろ、ラッシュアワーの時に急激な TP の上昇を確認することができる。

これは 4 番オペレーターとは違って LF より HF の上昇がより大きいということを意味する。これで、業務量の上昇に伴うストレスの増加と、それらのストレスに起因した損傷を防ぐため、TP も増加するものと解釈することが可能である。

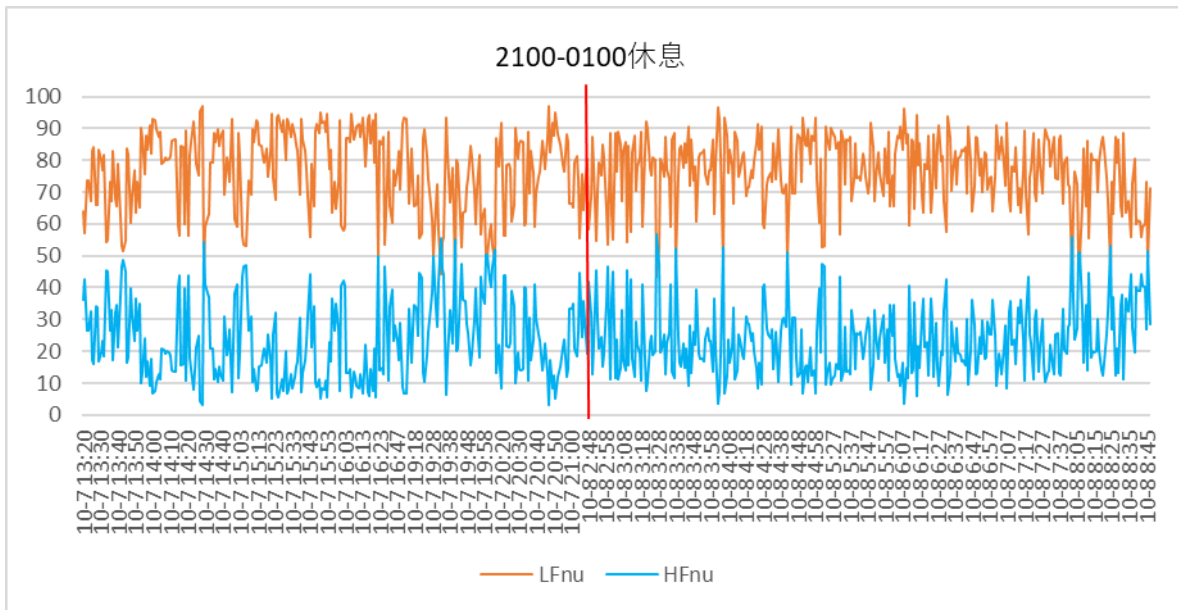
表 6.9 オペレーター6 番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

	HR	SNS	TP
出	94.1	5.63	49.9
21 時間勤務			
退	80.5	4.99	67.6

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP: ms<sup>2</sup>

図 6.13 は 7 番オペレーターの日周期リズムを表す。出勤時と休息後、退勤直前には副交感神経の優位を、昼間と休息前には交感神経の優位を表した。

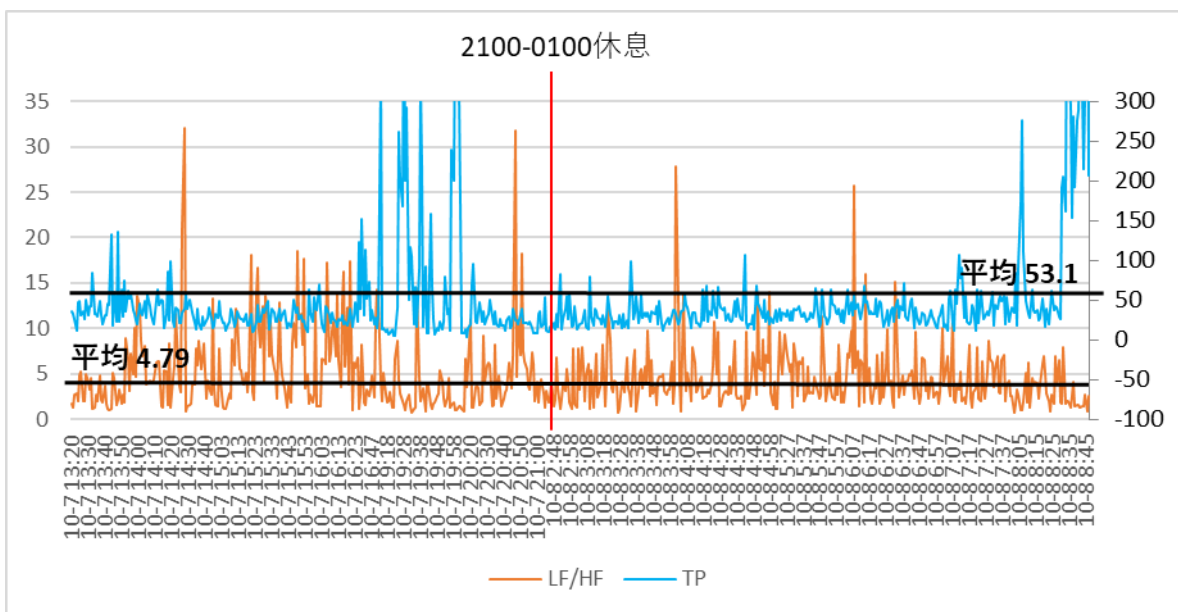
全体的に交感領域が優位を示していると解釈でき、退社に近づくほど副交感領域が広がっていることが観察できる。



※ 縦軸単位: %

図 6.13 オペレーター7 番の日周期リズム

図 6.14 に示すように 7 番オペレーターの場合、TP の平均値が低いのが、LF/HF の平均値も低い。両者の変動幅は非常に狭く、LF が上昇しないにもかかわらず TP が急激に上昇する場合がある。これは TP の上昇を HF が主導すると解釈できる。



※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP (ms<sup>2</sup>), 横軸: 測定時刻

図 6.14 オペレーター7 番のストレスと疲労の変動

表 6.10 は 7 番オペレーターの 1 回の交代勤務数値を示している。6 番オペレーターと比較して思えば、急激な上昇を除いては、ストレスと TP の変化の幅が狭いということを確認することができる。また、出勤時と退勤時のストレス数値はやや増加したが、3 以下の非常に低い数値だった。TP は 178 の急激な上昇を見せてくれた。夜 12 時以前の休息を取る前に急激にストレスの数値が上昇したが、19 時から 20 時の間に急激な TP の上昇も確認された。

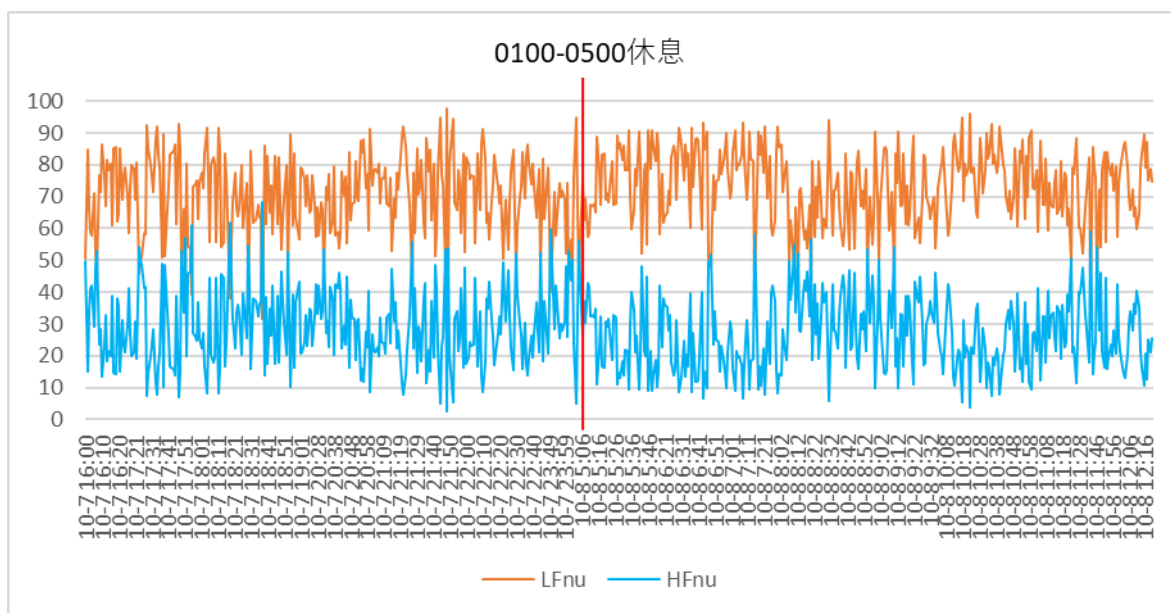
表 6.10 オペレーター7 番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

	HR	SNS	TP
出	97.6	2.73	43.3
21 時間勤務			
退	91.8	2.97	178.1

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP:  $\text{ms}^2$

図 6.15 は 8 番オペレーターの日周期リズムを表す。出勤時と休息の直前では副交感神経の優位を示し、昼間と休息後に交感神経が優位を表した。変動幅が大きく、ラッシュアワーには副交感領域が優位を占めていることが観察できる。

また、交感領域と副交感領域が一定の周期で交互に優位を示していると解釈できる。

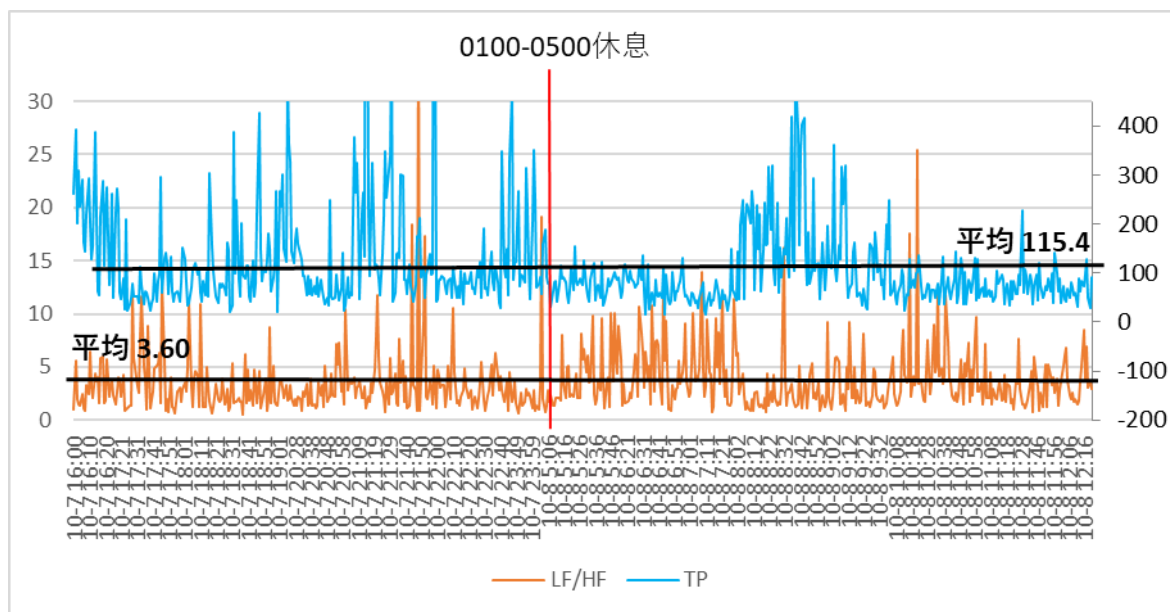


※ 縦軸単位: %

図 6.15 オペレーター8 番の日周期リズム

図 6.16 に示すように 8 番オペレーターの場合、TP の平均値が 100 以上と非常に高い。LF/HF の平均値は 3.6 に非常に低い。両者の変動幅も非常に広く、休憩時間の前まで TP の上昇を見せていたが、休息後には上昇せず、7 時頃から上昇した。





※ 左縦軸: LF/HF ratio, 右縦軸: TP (ms<sup>2</sup>), 横軸: 測定時刻

図 6.16 オペレーター8番のストレスと疲労の変動

表 6.11 は 8 番オペレーターの 1 回の交代勤務数値を示す。退勤の時はストレスと疲労の数値は増加したが、増加した数値自体も高い数値ではない。

出勤時の TP は 200 が超える高い数値だったが、次第に減少し、休憩の前に上昇した。午前 0 時以降の休憩後は TP が上昇せず、午前 8 時ごろから上昇した。ストレスは夕方に急上昇し、休憩直前に上昇した。休憩後も上昇した。

表 6.11 オペレーター8番の出勤時と退勤時のストレスと疲労

	HR	SNS	TP
出	80.2	3.02	209.6
21 時間勤務			
退	71.6	3.68	70.8

※ HR: bpm, SNS: LF/HF ratio, TP: ms<sup>2</sup>

## 6.5 集中勤務時間帯の状態結果

表 6.12 は集中勤務時間帯の数値を示す。集中勤務時間帯は測定者がオペレーターの生体情報の測定のためにオフィスに在室していた当時、オフィス全体の忙しきの度合いが大きいと個人的に判断されていた時間帯として、その当時の測定された生体情報を分析したものである。心拍数は全体平均と大差はなかったが、集中勤務時間にはストレスと疲労の数値はさらに高かった。表 6.12 の勤務時間帯別の平均値でも 05 時から 09 時の間のストレスの数値が最も高かったものを比較して見ると、船舶の出入航時間が集まるラッシュアワー(測定者が観察した結果、7 時頃)のような業務量が集中する時間帯におけるストレスや疲労が増加していると解釈することが可能である。



表 6.12 集中勤務時間帯の平均値

	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
ストレス(SNS)	6.52	5.33	6.09	6.65	3.90	4.93	4.41	3.49	5.17
HR	86.0	76.8	86.4	93.5	85.7	86.3	88.1	71.7	84.3
疲労(TP)	43.89	95.78	61.30	52.11	75.59	84.83	40.71	74.63	66.11

※ SNS: LF/HF ratio, HR: bpm, TP: ms<sup>2</sup>

## 6.6 特定業務別の心拍数とストレス

表 6.13 は特定業務別にオペレーターの平均値を示す。特定業務は測定者がオペレーターの生体情報の測定のためにオフィスに在室していた当時、オペレーターが行っていた業務を観察し、時間を記録して数値を示したものである。英語交信のストレスと疲労が最も高かった。

日本語交信より電話通話の疲労度が高かったが、ストレス数値が低いことが分かった。これは電話の通話時間が VHF 交信時間より長いためと解釈することができる。

そして、双眼鏡や港湾の CCTV で船舶を観察する見張りの場合にはストレスは非常に高かったが、TP 数値の減少は小さかった。これは集中が必要なのでストレスが高まるが双眼鏡まで移動するので自律神経量が増えたものと考えられる。

また、航空機がオフィスビルを通過する場合には、ストレスと疲労が増加することが確認できたが、TP 値の減少が目立つ。これは航空機の通過が一時的なものではなく、長時間にわたる疲労の累積と解釈できる。European Commission Directorate-General for Employment and Social Affairs の Guidance on work<sup>(4)</sup> (2000) から騒音は注意力と精神集中を妨害するという内容と一致する部分だと解釈できる。

表 6.13 特定業務の平均値

* /	日本語 交信		英語 交信		電話		見張り		航空機通	
	SNS	TP	SNS	TP	SNS	TP	SNS	TP	SNS	TP
1	7.26	42.19	6.20	47.70	7.30	41.34	9.15	46.63	6.35	48.35
2	5.74	106.8	5.29	73.82	5.24	96.96	5.43	86.81	4.22	63.26
3	5.81	68.51	6.53	82.14	5.83	65.30	7.68	76.85	8.07	94.56
4	4.81	52.78	4.60	45.89	4.93	52.18	9.73	55.07	5.11	54.88
5	3.63	71.74	3.68	73.05	4.69	95.27	3.53	80.83	3.48	72.76
6	5.67	80.00	7.75	62.14	4.31	41.17	7.46	101.66	5.52	54.31
7	4.59	34.30	3.85	28.70	4.20	110.8	×	×	7.96	28.59
8	2.48	83.71	×	×	4.14	61.40	×	×	3.96	80.36
平	5.49	70.33	5.67	64.12	5.38	65.37	7.16	74.64	5.46	57.69

※ \*: オペレーター番号, SNS: LF/HF ratio, TP: ms<sup>2</sup>, 交信: 国際 VHF を利用した船舶との交信

×: 測定期間中、当該業務をしないこと(平均は 7、8 番オペレーター除外して計算)

## 6.7 SNS 数値が 20 以上の急激に上昇した場合

表 6.14 表は、各オペレーターたちの SNS(LF/HF)数値が 20 以上を超える時の回数、SNS の最大値とその当時の心拍数、随行した業務を示す。1、2、3 番オペレーターは 45 時間以上、4 番オペレーターは 30 時間以上、5、6、7、8 番オペレーターは 16 時間程度を測定したので、1 番から 4 番オペレーターの回数が多いのは当然なのだろうが回数を時間に換算しても 1 番から 4 番オペレーターの回数は多い。特に 1 番オペレーターの回数が最も多いということを知ることができる。1、3、7 番オペレーターは SNS が最も高いときの心拍数が 90 を超える。しかし、当時の業務は一つの業務だけを行っていた。一方、2、4、5、6 番オペレーターは SNS が最大値である当時の心拍数が 70 代に低かった。

これは前述のようにポリヴェーガル理論における背側迷走神経の活性化により外部的な心拍数は低い、内部的にはストレス反応が起きていると解釈でき、腹側迷走神経の活性化による社会的反応と解釈できる。後者ならストレス的な状況で落ち着きを失わずに勤務していることを意味する。前者は慢性的なストレスを示唆して後者はストレスに対する肯定的な対応として ISO 10075 での短期露出による促進効果での活性化や学習、長期露出や繰り返し露出による促進効果での練習効果や力量開発における運動習熟や業務の熟練度と関連していると解釈することが可能である。

ストレスと心拍数がいずれも高いのは闘争・逃走反応につながる。これは慢性的なストレス反応の前段階の急性ストレス反応と解釈できる。そして 2、4、8 番オペレーターは SNS 数値が最も高いとき、二つ以上の業務を遂行していた。これは、様々な種類の業務を行う場合にストレスが高まる可能性があることを示唆する。

表 6.14 SNS 数値が 20 以上の場合

*	回数	平均	最大値	当時 心拍数	当時 業務
1	59	26.07	42.39	91.2	6 月 17 日 06 : 11 動静把握
2	41	26.81	69.82	71.9	5 月 27 日 05 : 14 港務通信, 動静把握
3	42	25.77	47.50	96.5	6 月 10 日 14 : 35 動静把握
4	42	27.00	49.14	77.9	10 月 2 日 03 : 02 港務通信, 動静把握
5	4	28.35	38.21	78.0	10 月 2 日 09 : 48 動静把握
6	8	26.87	32.99	79.4	10 月 1 日 22 : 49 動静把握
7	5	27.68	32.09	98.5	10 月 7 日 14 : 28 情報収集
8	2	32.17	38.98	86.9	10 月 7 日 21 : 48 港務通信, 情報収集

※ \*: オペレーター番号, SNS: LF/HF ratio, 心拍数: bpm

## 6.8 心拍数が 100 以上の急激に上昇した場合

表 6.15 は 8 人のオペレーターの心拍数が 100 を超える時の回数と最大心拍数、最大心拍数に到達した当時の SNS 数値と随行した業務を表す。まず、4 番オペレーターの回数として測定時間を考慮しても、圧倒的に高い回数であることを確認することができる。

しかし、8 番オペレーターは測定期間中の最大心拍数が 94.23 だったし、心拍数とストレスの数値が非常に安定していた。2 番オペレーターも全体の心拍数の平均値は 77.8 として二番目に低かった。これは 2 番オペレーターの心拍の変動が大きいということを示唆する。

また、8 人のオペレーターのうちで心拍数が 100 を超える時も、当時の SNS 数値は 3、6 番オペレーターを除いては平均より高くないということを知ることができる。

これは、前述のように内因性心拍数(Intrinsic cardiac rate)は交感神経と副交感神経がすべて作用しないと仮定したとき、純粋に洞房結節から出る拍動数が 100-120 程度ということを知ることができた。これは交感神経の亢進による心拍数の上昇ではなく、副交感神経の抑制による心拍数の増加であることを示唆する。

しかし、ストレス数値は低く、心拍数は高い状態は一般的なストレス反応とは違う。心拍数が 100 以上の場合に業務を遂行している状態だと仮定することが可能であるのでこれは業務遂行のための心拍数の増加だが、低い SNS 数値はストレスを受けていない状態だと解釈することが可能である。

このような仮定が正しければポリヴェーガル理論での最適の覚醒状態な耐性領域での勤務だと解釈することも可能である。実際に測定されたデータを分析してみると、心拍数は高いが SNS 数値は低い場合、耐性領域の亢進、つまり腹側迷走神経の活性化として迷走神経の緊張の度合いを示す pNN50 と rMSSD の数値が、平均以上であり、非常に高かった時が多かった。

これは心拍数が高く、ストレス数値が低い状態は腹側迷走神経が活性化している耐性領域であるという仮定が可能であった。このような仮説を証明するために、オペレーターたちの耐性領域に留まる時間を分析した。

特に耐性領域という手がかりとなる LF/HF の数値は周波数領域の指標であるが、時系列領域指標である pNN50、rMSSD と比較することは測定データの信頼度を確認する良い手段だと思われる。このようなデータの比較は「6.10 交代勤務耐性に関する分析」で詳しく分析した。

lnHF も、迷走神経の緊張度を示す指標であるが、LF/HF と同じ周波数系列指標であり、LF/HF の計算式において数値が下がるには HF の数値が大きくなるのが当然なので、比較対象から除外した。

表 6.15 心拍数が 100 以上の場合

* /	回数	平均	最大値	当時 SNS	当時 業務
1	37	103.5	115.9	3.59	5 月 26 日 09 : 26 動静把握,情報収集
2	33	103.6	113.2	2.81	5 月 26 日 09 : 25 港務通信, 動静把握
3	57	102.1	107.2	6.33	5 月 27 日 14 : 14 情報収集
4	515	106.9	128.8	3.95	10 月 1 日 19 : 54 動静把握,情報収集
5	12	101.5	105.2	2.62	10 月 1 日 21 : 39 港務通信
6	45	103.1	111.3	5.03	10 月 1 日 17 : 47 情報収集
7	193	108.3	130.2	1.99	10 月 7 日 19 : 15 港務通信, 動静把握
8	0	0	94.23	2.65	10 月 7 日 20 : 57 港務通信

※ \*: オペレーター番号, SNS: LF/HF ratio, 心拍数: bpm

## 6.9 対象者のアンケート分析

表 6.16 の交代勤務耐性に対するアンケートを分析してみると、不安と憂鬱の領域では 4 番オペレーターを除いたすべてのオペレーターが該当することが分かった。業務量が船舶の出入港によって変わるだけに、いつ業務が発生するかわからない状況が原因だと推測することができる。不安と憂鬱の領域を除けば、2、5、6、7 番オペレーターが他のオペレーターたちより相対的により良い結果を持っていることが分かった。

表 6.16 交代勤務の耐性

* /	1 F	2 M	3 F	4 M	5 M	6 F	7 M	8 F
不眠症	○ 6	× 5	× 13	○ 15	○ 10	× 2	× 1	○ 14
睡眠障害	× 4	× 7	× 2	× 5	× 5	× 5	× 8	○ 13
慢性疲労	○ 4	× 0	× 0	× 0	× 0	× 0	× 2	× 2
不安	○ 9	× 4	× 4	× 0	× 7	○ 10	× 1	○ 8
憂鬱	× 6	× 3	× 3	× 0	× 6	× 4	○ 10	× 3

※ \*: オペレーター番号, M: Male, F: Female, ○: 該当, ×: 該当無

不眠症: 42 満点, 昼と夜に 3 点以上がそれぞれ 1 つ以上ある場合、不眠症存在

睡眠障害: 24 満点, 11 点以上ならば、睡眠障害に該当

慢性疲労: 11 満点, 4 点以上ならば、慢性疲労に該当

不安: 21 満点, 8 点以上なら該当

憂鬱: 21 満点, 8 点以上なら該当

表 6.17 を見ると、交代勤務耐性に最も大きな影響を与える強靱性においては 2、3、8 番オペレーターが目立つ。2、8 番オペレーターが運動をしているということと関連していると思われる。4、5 番オペレーターも運動をするのに比較的到低い数値ではないが、運動をしない 1、

6、7 番オペレーターの数値はもっと低いということも運動との関連をしめしている。

1、2、3 番オペレーターは朝型人間に 7、8 番オペレーターを夜型人間に近いということが分かる。どちらが交代勤務耐性に役立つかは研究ごとに結果が違ふ。(朝型人間: 早寝早起きで、早朝が一日のうちで最も活動的な人、夜型人間: 午前中や日中より夜の方が仕事や作業が捗るという人) Masaya TAKAHASHI の研究(2005)では夜型人間がさらに交代勤務に適応力が高いという結果もある<sup>(67)</sup>。

今回の研究では夜型人間の傾向を持っている 7、8 番オペレーターが睡眠時間の変化にもよく寝て柔軟性の領域の点数が高く、朝型人間の傾向を持つ 2、3 番オペレーターは柔軟性の点数が低いので夜型人間がポータラジオの交代勤務に適していると解釈することが可能だが、1 番オペレーターの場合、最も朝型人間の傾向が高いにもかかわらず、柔軟性点数が高いので朝型と夜型が交代勤務への適応力で持つ意味は、個人によって違ふと解釈することが可能である。

表 6.17 交代勤務耐性に影響を及ぼす追加要素

* \	1 F	2 M	3 F	4 M	5 M	6 F	7 M	8 F
強靱性	21	31	31	25	23	19	21	28
睡眠覚醒	13	14	13	12	8	8	7	6
柔軟性	10	7	8	8	9	9	10	15
無力感	11	12	12	10	13	21	13	18

※ \*: オペレーター番号, M: Male, F: Female

強 靱 性: 45 満点, 点数が高いほど強靱性が高い

睡眠覚醒: 21 満点, 点数が高いほど朝型人間

柔 軟 性: 20 満点, 点数が高いほど不規則な時間でも眠れる

無 力 感: 24 満点, 点数が高いほど眠気に耐えられない

概略的にはアンケートでは 2、3、4 番オペレーターが他のオペレーターたちより良好と判断することが可能であった。しかし、今回使用したアンケートは、Seo, Yeon-ok, Kim, Souk Young の研究<sup>(34)</sup> (2016) のように、数百人の同種のオペレーターを対象としたものであり、本研究では特定の部分での測定された生体情報と、実際にオペレーターが自覚している心的負荷を比較する参考資料として活用した。

Seo, Yeon-ok, Kim, Souk Young の研究<sup>(34)</sup> (2016) では、強靱性が高いほど、無力感が低いほど交代勤務耐性が高くなることが分かった。交代勤務耐性に最も大きな影響を与えた変数は強靱性で、その次に変数は無力感だった。無力感が高く、柔軟性が低いほど交代勤務耐性が低いことが分かった。

## 6.10 交代勤務耐性に関する分析

各オペレーターの全体データを総合して導き出された新しい指標を用いてグラフで図式化した。各オペレーター別に現れるグラフ上の模様を比較することができ、交代勤務の耐性が相対的に高いオペレーターとそうでないオペレーターの間で共通の特徴が発見された。

### 6.10.1 1 番オペレーター

図 6.17 は 1 番オペレーターのローレンツプロット(Lorenz Plot, LP)を示す。ローレンツプロットは自律神経機能検査の一つとして横軸を  $n$  番目の RRI、縦軸を  $n+1$  番目の RRI でグラフ上にプロットしたもので、すべての点を原点からの距離の標準偏差を算出して、その長軸と短縮で可能な楕円の面積の値を評価する。

LP の面積は、副交感神経活動の指標とされる HF の間で相関関係が認められている。プロットされた点分布による RRI の変動を視覚的に把握する有用な方法であると報告されている。RRI の変動が大きいほどグラフ上の点が広く多様に分布する<sup>(57)</sup>。

つまり、基準線で広範囲に広がっているほど、右側上段に近いほど心拍変動性を高いということの意味するが、1 番オペレーターは中央に集中する姿を表す。

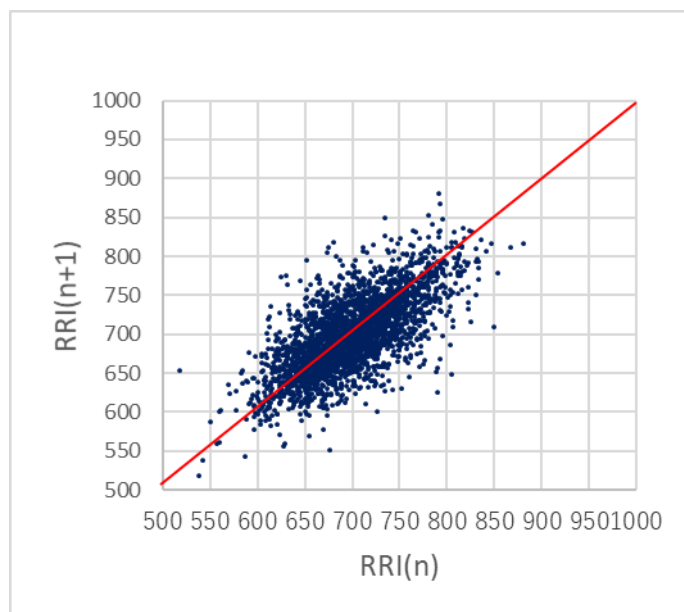


図 6.17 オペレーター1 番 ローレンツプロット

図 6.18 は交感神経と副交感神経のバランス度を示している。交感神経を示唆する  $\ln LF$  と副交感神経を示唆する  $\ln HF$  との関係を示し、どちらに偏っているかがわかる。横軸と縦軸の数値は TP を表す。測定されたデータはすべて勤務中に測定されたものであるため、交感神経に偏るのが正常だ。しかし、数値の密集した位置によって交感神経と副交感神経が亢進した程度を知ることができる。1 番オペレーターは交感神経に偏って集中されていて密集した位置の数値も比較的高くない。

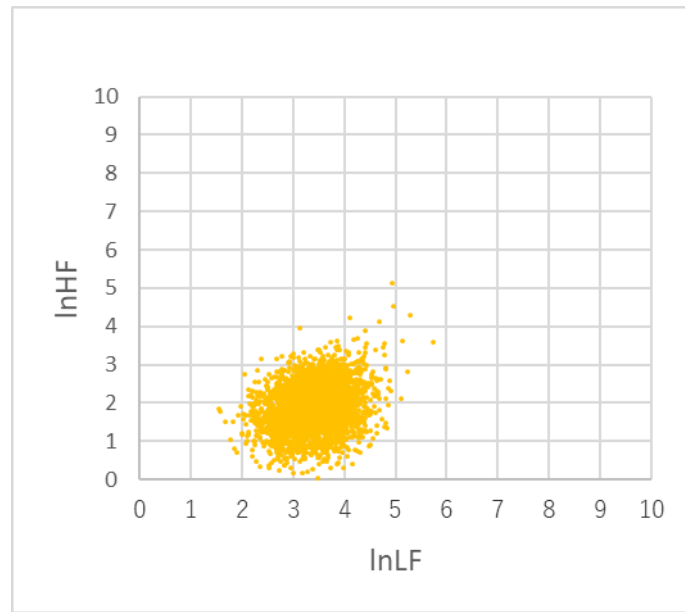


図 6.18 オペレーター1 番 自律神経のバランス

図 6.19 は代表的な迷走神経の緊張の大きさを表わす。pNN50 と rMSSD のグラフである。rMSSD は、短期的な指標であり、24 時間の rMSSD 数値は pNN50 と HF power と深くつながっている。また SDNN より副交感神経の影響をより大きく受ける<sup>(14)</sup>。1 番オペレーターは rMSSD より pNN50 に偏った姿であり絶対的な数値も大きくないながら集中している。

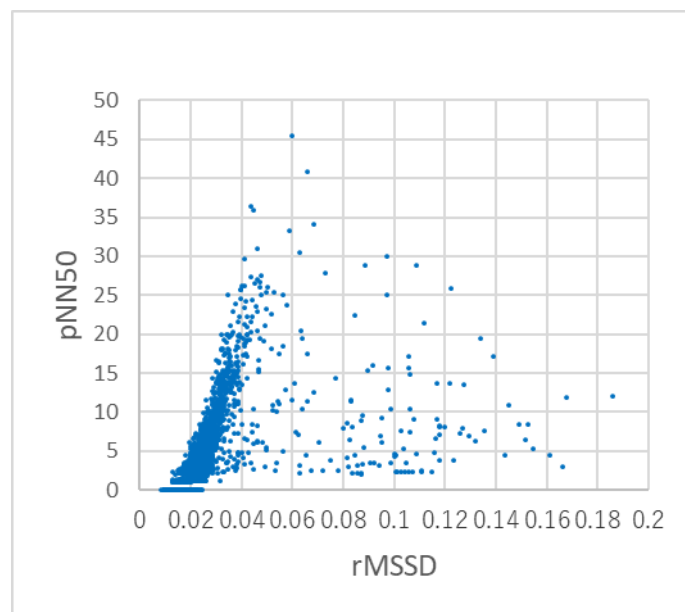


図 6.19 オペレーター1 番 迷走神経量の分布



図 6.20 はストレスと迷走神経の活動性のグラフである。横軸の LF/HF は小さいほど、縦軸の CVRR を大きいほど健康な状態を意味する。しかし、1 番オペレーターは LF/HF は大きい  
が、CVRR の低い数値を表す。

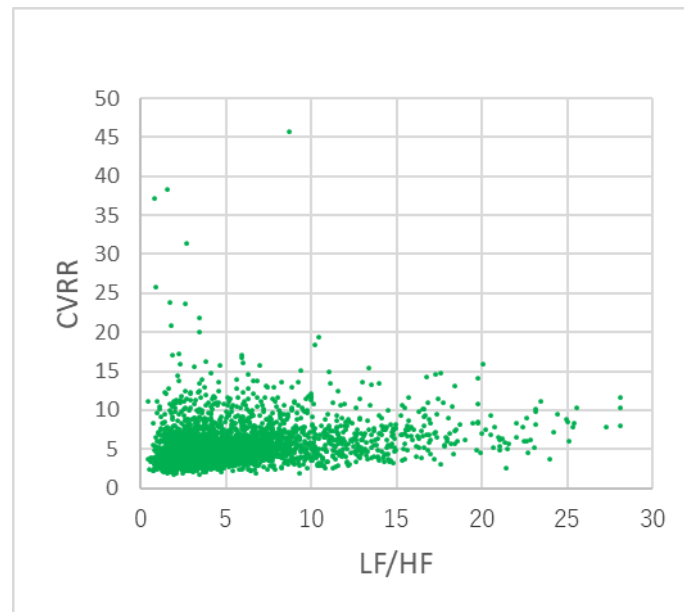


図 6.20 オペレーター1 番 ストレスと迷走神経の活動性

図 6.21 は心拍数とストレスの関係を示す。これは 6.8「心拍数が 100 以上の急激に上昇した場合」で説明したように心拍数は高いが、ストレスは小さい状態を耐性領域と仮定する場合に迷走神経の緊張を分析するためのグラフである。

グラフの左上の部分はストレスが平均より小さく、心拍数が平均より高い耐性領域を解釈することができる。グラフの右上の部分はストレスと心拍数が両方とも高い状態で、ポリヴェーガル理論からの闘争・逃走反応に係わる過覚醒領域と解釈できる。

また、グラフの右下の部分は心拍数が低い、ストレスが高い状態で凍り付き反応と関連する低覚醒領域で慢性ストレスと関連があると解釈できる。グラフの左下の部分はストレスも心拍数のいずれも低い状態であり、業務を行っているとも解釈できるが、業務強度が低かったり、業務量がなかったり、小さな休息状態に解釈することが可能である。

1 番オペレーターは耐性領域よりは過覚醒領域や低覚醒領域がもっと広いということを確認することができる。このグラフの左側上段が実際にもポリヴェーガル理論の耐性領域かどうかを確認するためにオペレーターの耐性領域と腹側迷走神経の指標である pNN50 と rMSSD の間の相関関係を分析した。

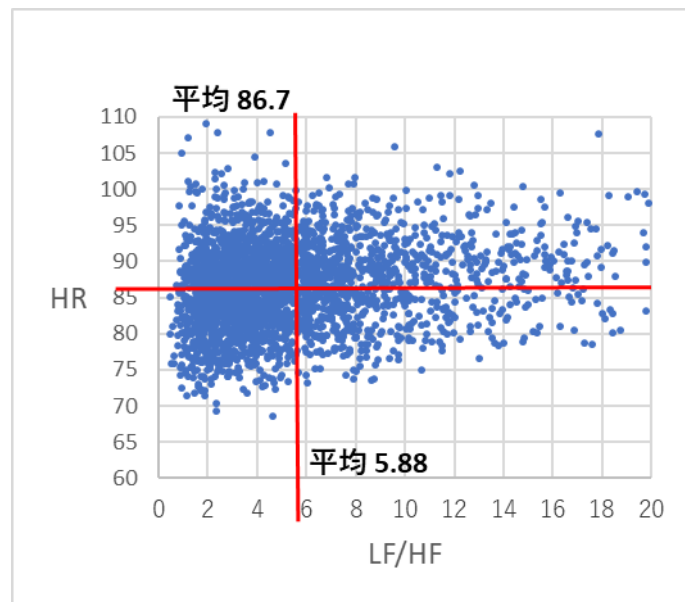
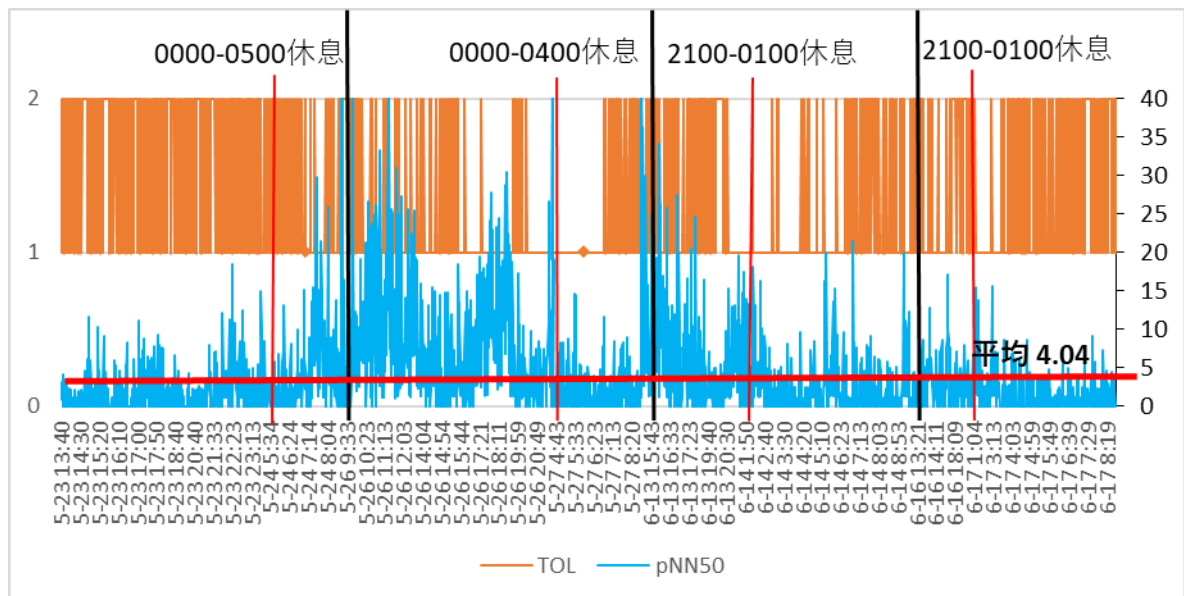


図 6.21 オペレーター1 番 耐性領域

図 6.22 は図 6.21 のグラフで耐性領域に該当する部分を 2、そうでない部分を 1 で表示して耐性領域を区分し、その当時の pNN50 と rMSSD の数値の変動を比較した。

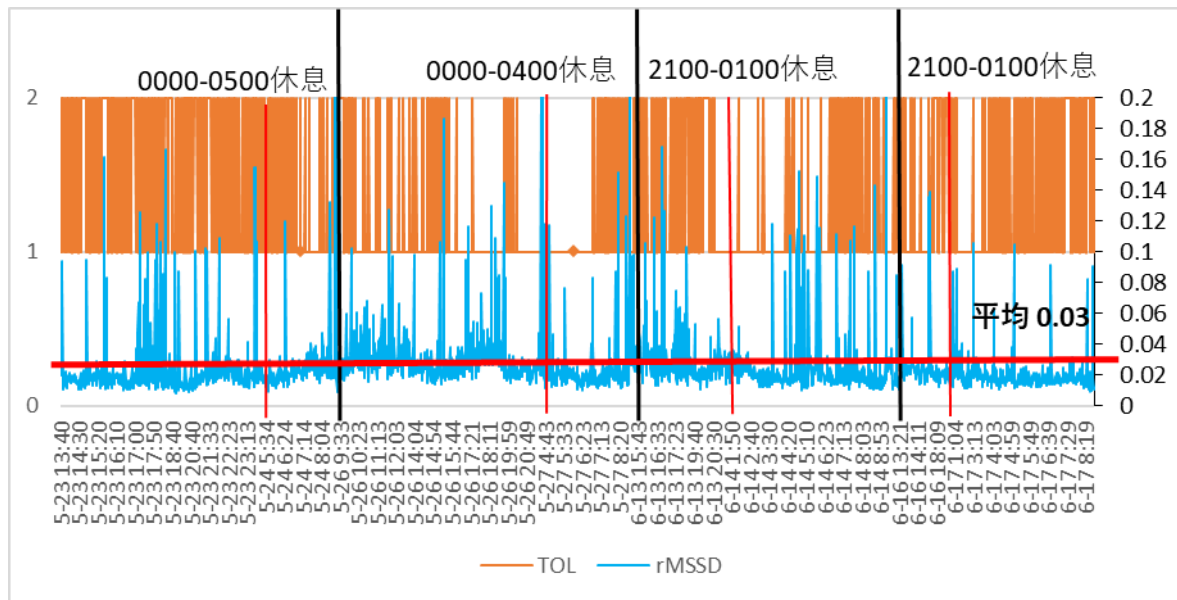
耐性領域がない部分での pNN50 と rMSSD の変化は考慮されていなかった。1 の領域は過覚醒、低覚醒あるいは休息の状態であり、それと関連して pNN50 と rMSSD の個別的な変動が可能のためである。1 番オペレーターは耐性領域の時に pNN50 が平均以上の場合が多かったが、直接的な相関関係を見つけるのは難しかった。pNN50 の増加と耐性領域が必ずしも一致するわけではないためである。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し、2-耐性領域該当、右縦軸：pNN50 (%), 横軸：測定時刻

図 6.22 オペレーター1 番 耐性領域における pNN50 の変化

図 6.23 のグラフでも耐性領域である場合に rMSSD が平均以上の場合が多かったが、直接の一致関係を見つけることは難しかった。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.23 オペレーター1 番 耐性領域における rMSSD の変化

### 6.10.2 2番オペレーター

図 6.24 に示すように 2 番オペレーターの場合、1 番オペレーターより数値がさらに広く広まっており、右上段の高い領域に分布されていることを確認することができる。これは 1 番オペレーターより心拍変動性がより大きいということを意味する。

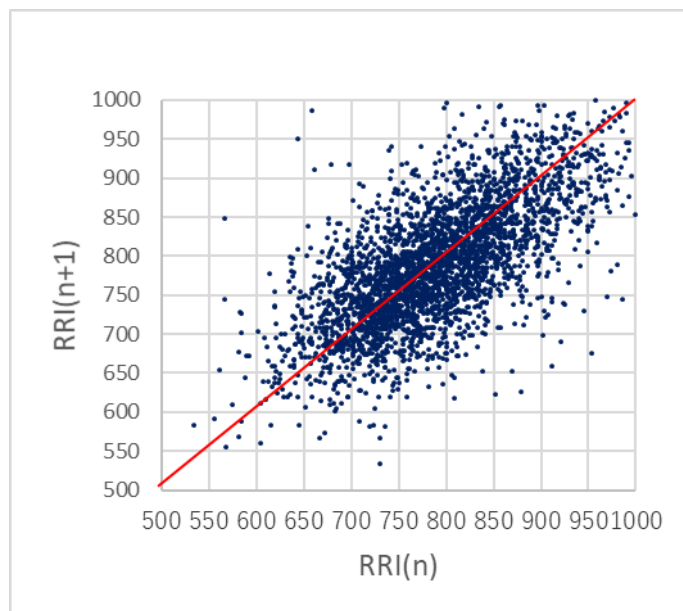


図 6.24 オペレーター2番 ローレンツプロット

また、図 6.25 に示すように 1 番オペレーターと同様に交感神経に偏っているが、数値がさらに高い領域に集中されている。また、1 番オペレーターより広く広がっている。

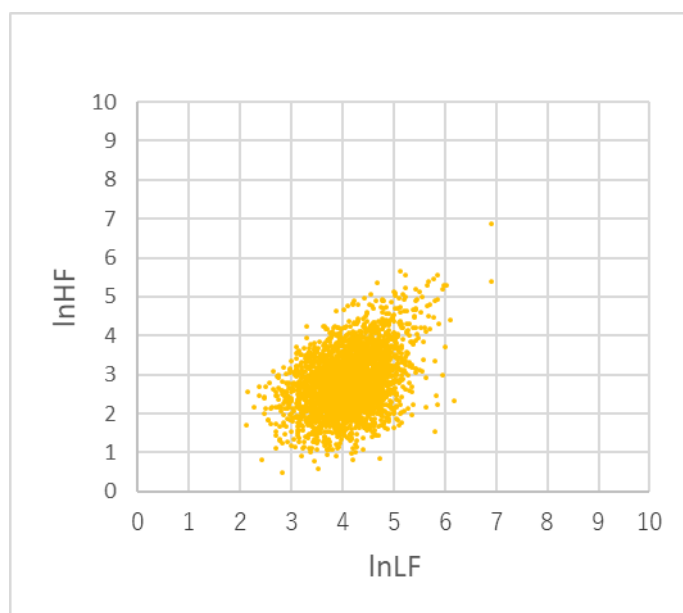


図 6.25 オペレーター2番 自律神経のバランス

図 6.26 に示すように迷走神経の緊張度も 1 番オペレーターに比べて rMSSD 領域にはるかに多い数値が分布しており、集中された部分の高さも高い。交代勤務耐性と関連した領域でも 1 番オペレーターより良い状態だと解釈することが可能である。

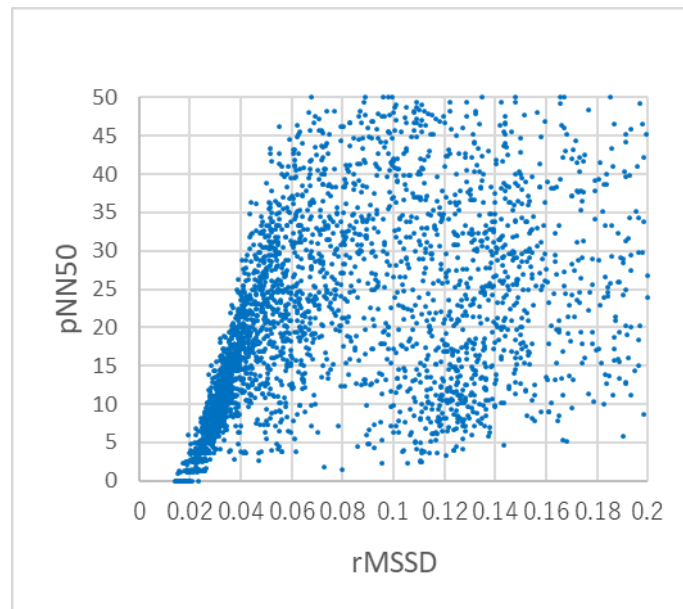


図 6.26 オペレーター2 番 迷走神経量の分布

図 6.27 のグラフでも 1 番オペレーターとは反対で左上段に該当する数値がはるかに多い。ストレスは小さく受けながら、迷走神経の活性化度が高いと解釈できる。

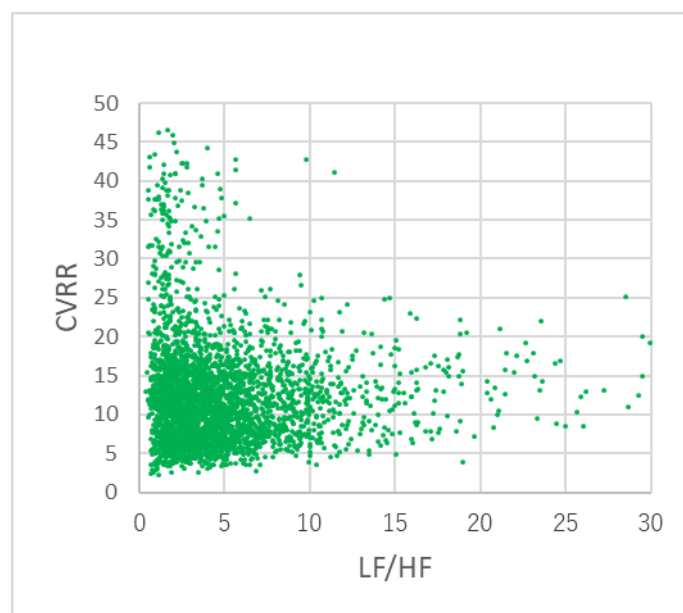


図 6.27 オペレーター2 番 ストレスと迷走神経の活動性

図 6.28 に示すように 2 番オペレーターは耐性領域より過覚醒領域がもっと広いということを確認することができる。

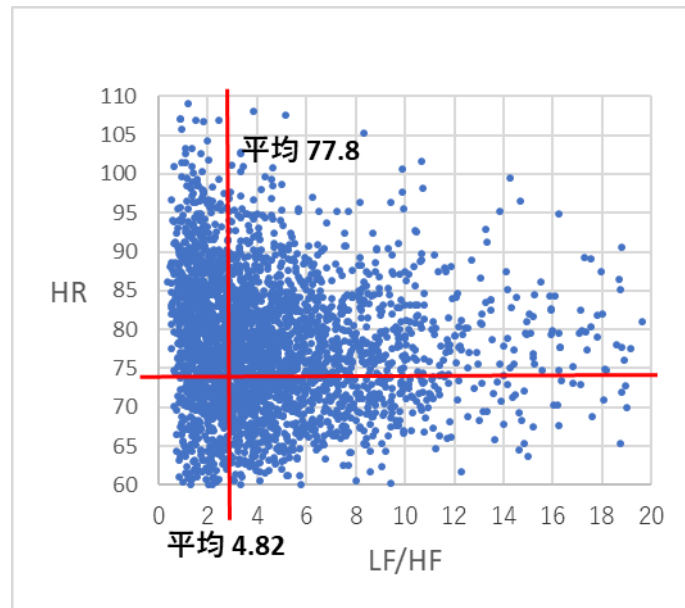
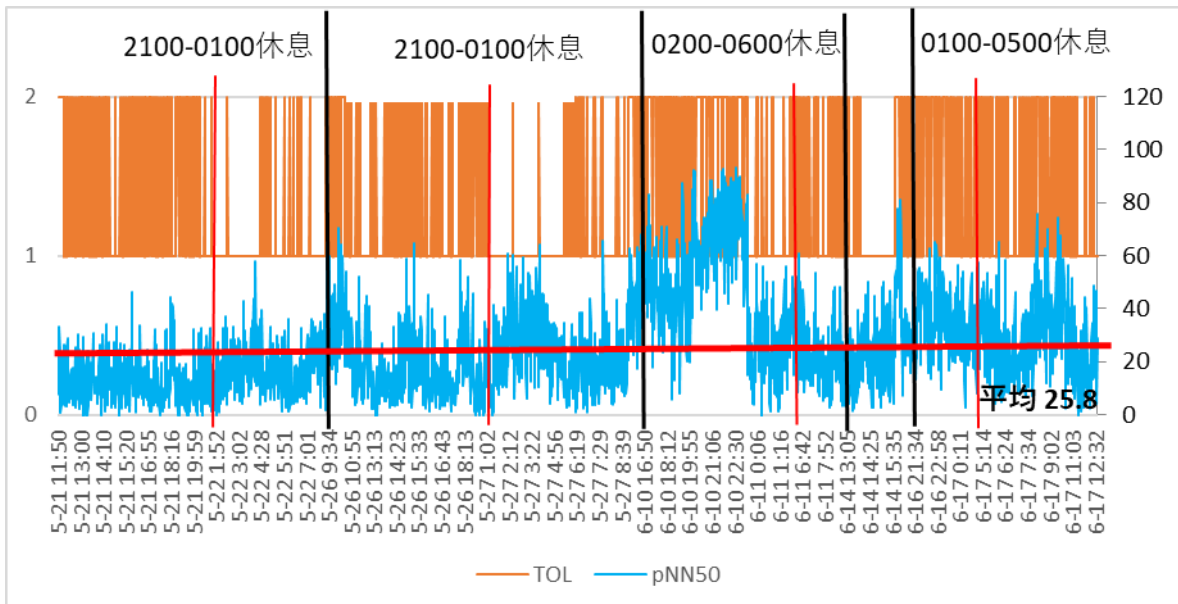


図 6.28 オペレーター2 番 耐性領域

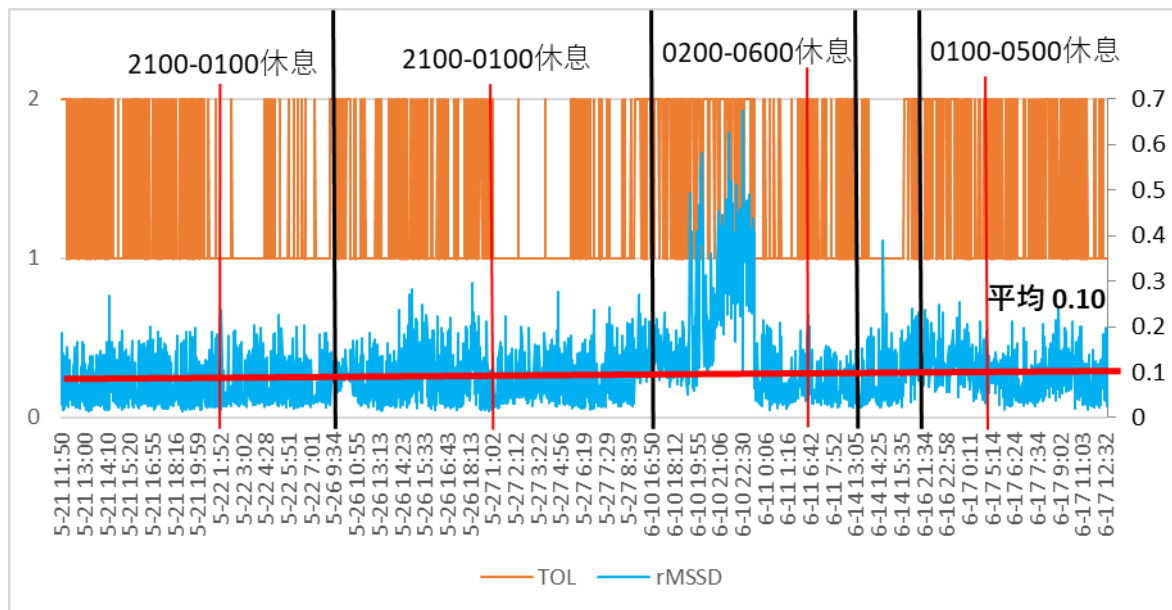
図 6.29 では、耐性領域における pNN50 の数値の平均以上である場合が多く、1 番オペレーターよりは高い直接的な相関関係を表した。午前 0 時以前に休息をとる場合は、休息後に耐性領域になるまで時間を要したが、午前 0 時以降に休息をとる場合は、直ちに耐性領域になると解釈することが可能であった。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：pNN50 (%)，横軸：測定時刻

図 6.29 オペレーター2 番 耐性領域における pNN50 の変化

図 6.30 に示すように rMSSD の場合にも pNN50 と似たような様相を見せているが、変動幅は大きくなかった。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.30 オペレーター2番 耐性領域における rMSSD の変化



### 6.10.3 3番オペレーター

図 6.31 に示すように 3 番オペレーターは 1 番オペレーターと似た位置に数値が集中している。しかし集中された領域が 1 番オペレーターより右側上段に上がった姿で心拍変動性がやや高めと解釈できる。

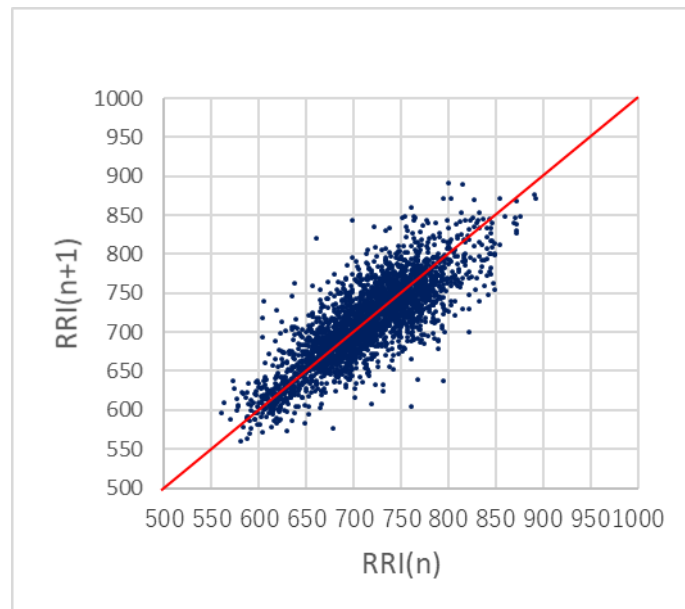


図 6.31 オペレーター3番 ローレンツプロット

図 6.32 に示すように 3 番オペレーターも交感神経に偏った姿を表す。密集度や位置は 1 番オペレーターと似ている。

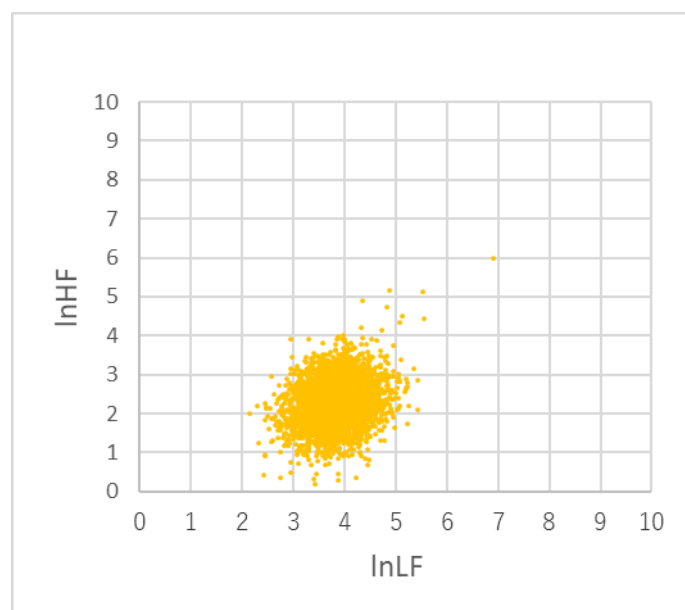


図 6.32 オペレーター3番 自律神経のバランス

図 6.33 に示すように 1 番オペレーターと迷走神経緊張強度で似たような姿を表すが、密集領域の数値がさらに大きく、rMSSD 領域の数値がより多いので、交代勤務耐性で 2 番オペレーターよりは低い、1 番オペレーターよりも高いと解釈できる。

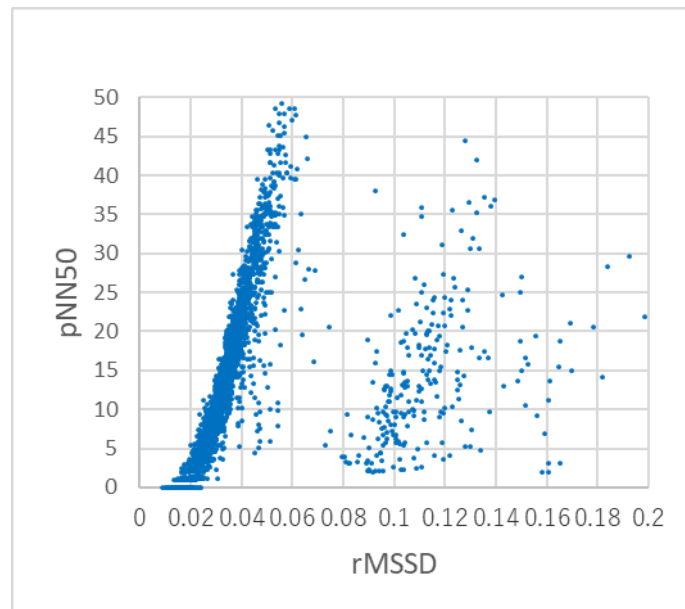


図 6.33 オペレーター3 番 迷走神経量の分布

図 6.34 に示すようにストレスと迷走神経の活性度では 1 番オペレーターと非常に類似した姿を表す。ストレス領域が高く、CVRR 領域は低かった。

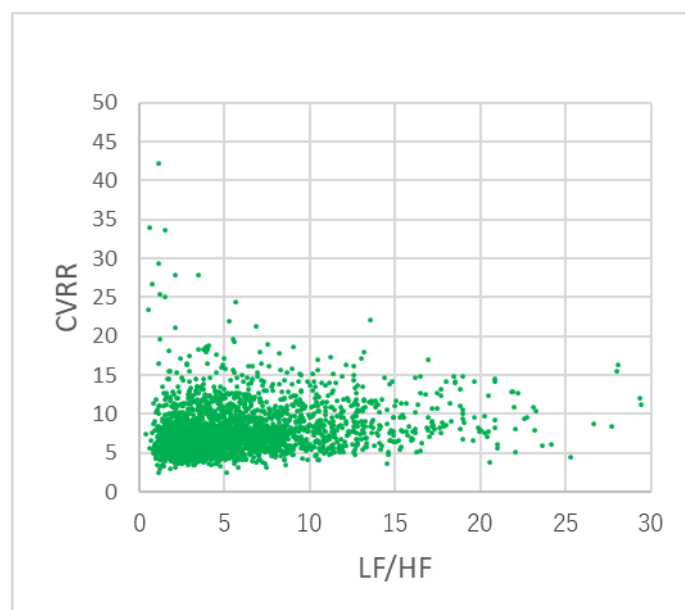


図 6.34 オペレーター3 番 ストレスと迷走神経の活動性

図 6.35 に示すように耐性領域部分でも 1 番オペレーターに似た形を示す。

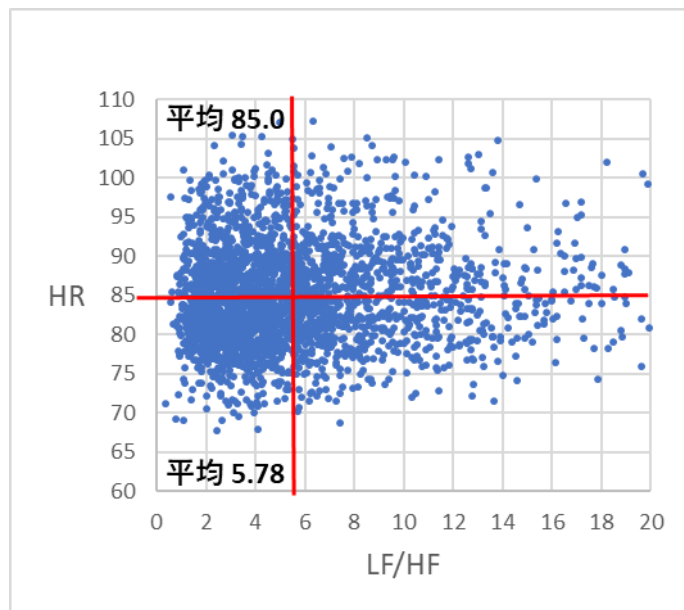
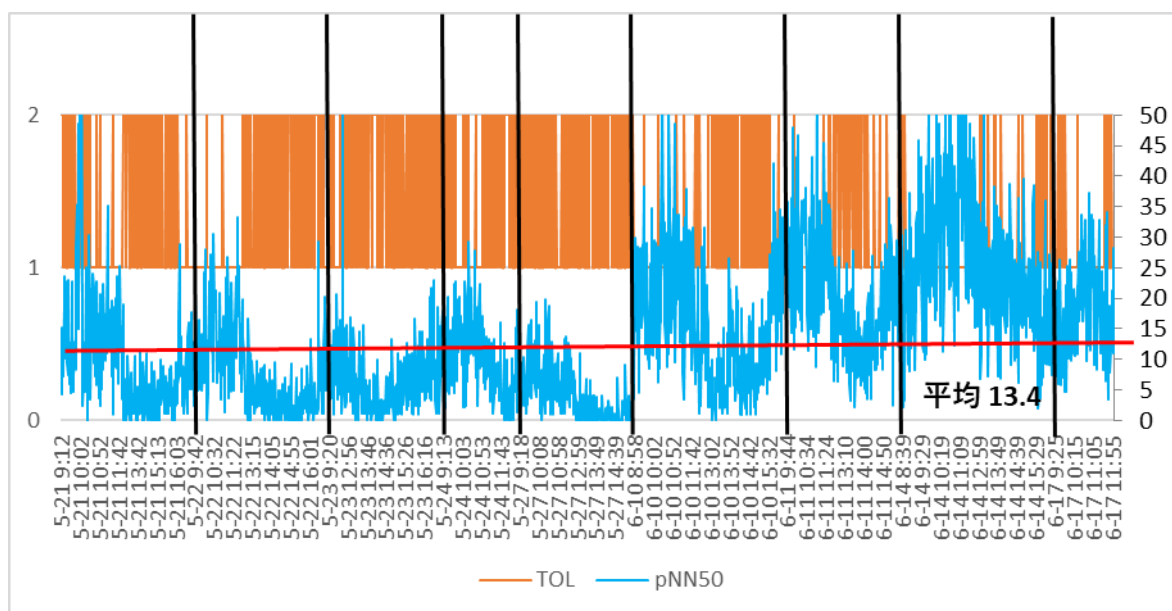


図 6.35 オペレーター3 番 耐性領域

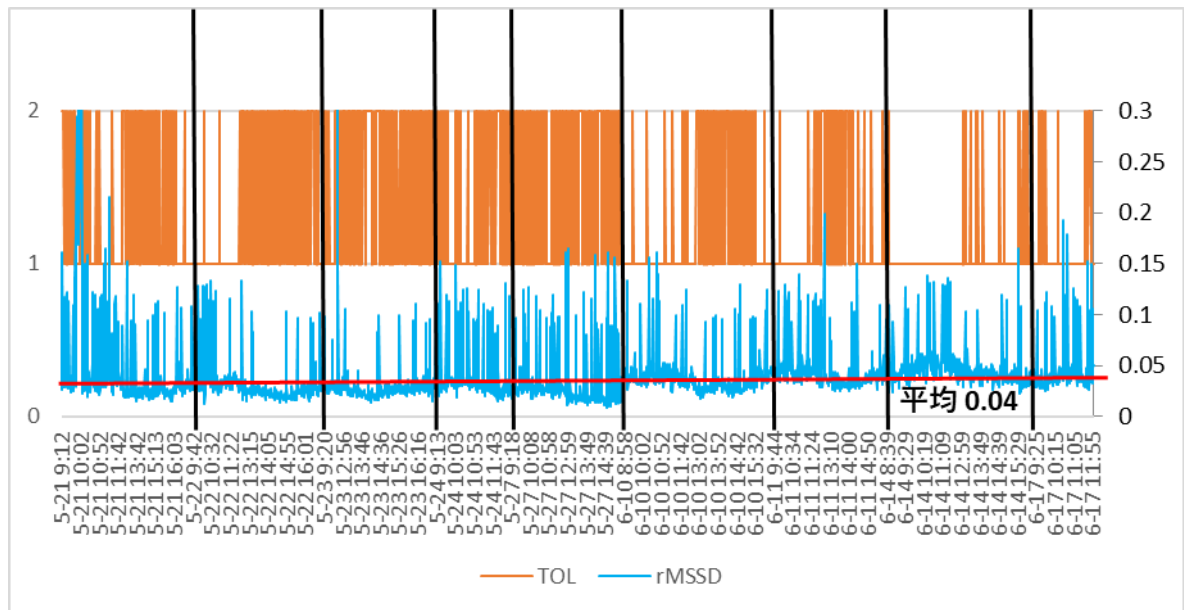
図 6.36 に示すように 3 番オペレーターの場合、耐性領域と pNN50 との相関関係が小さかった。耐性領域だが、pNN50 の数値が、平均以下である場合が多かったからである。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：pNN50 (%), 横軸：測定時刻

図 6.36 オペレーター3 番 耐性領域における pNN50 の変化

図 6.37 に示すように rMSSD でも耐性領域に該当する場合が存在したが、数値が平均以下の時も多かったため関連性が低かった。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.37 オペレーター3番 耐性領域における rMSSD の変化

#### 6.10.4 4番オペレーター

図 6.38 に示すように 4 番オペレーターは 1 番オペレーターより数値が広く広がっているけれどより低い領域に偏っている。これを変動性自体は高いが心拍変動の力が低いと解釈できる。

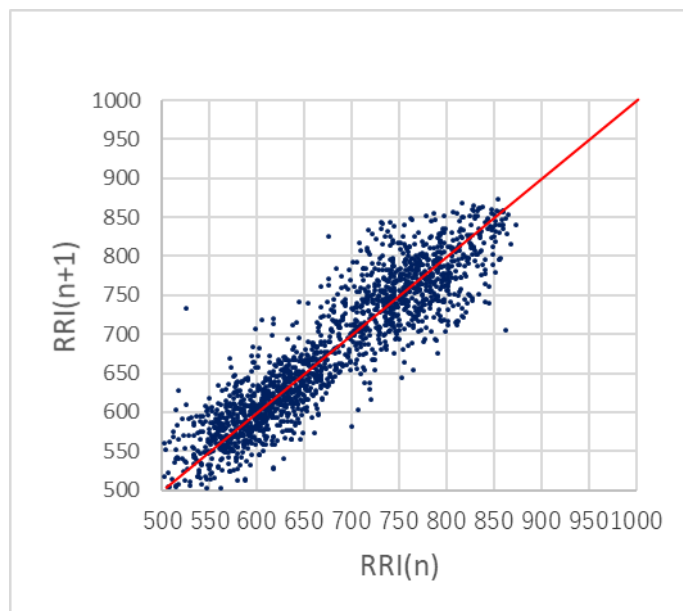


図 6.38 オペレーター4番 ローレンツプロット

図 6.39 に示すように 4 番オペレーターも交感神経に偏っており、1 番オペレーターのグラフに似た形を示している。

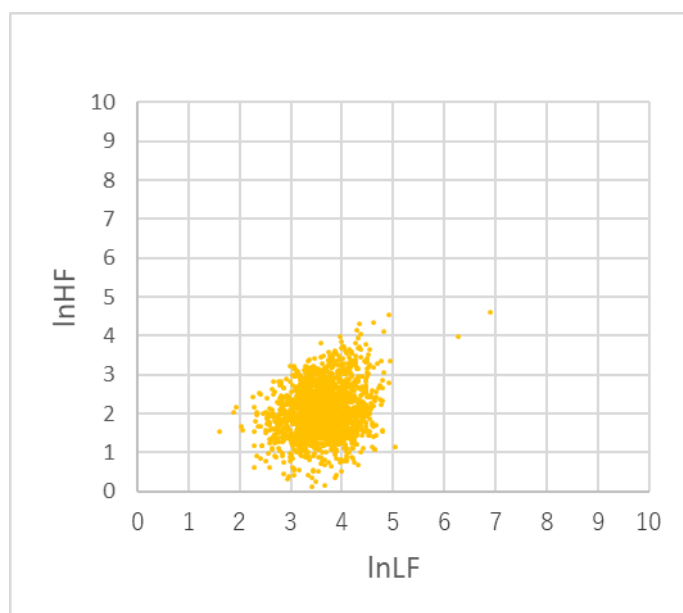


図 6.39 オペレーター4番 自律神経のバランス

図 6.40 に示すように 4 番オペレーターの場合、主に rMSSD 領域にたくさん偏っている。他のオペレーターらでは pNN50 の縦軸に集中した姿を表すが、4 番オペレーターは珍しくも密集された軸が見えない。

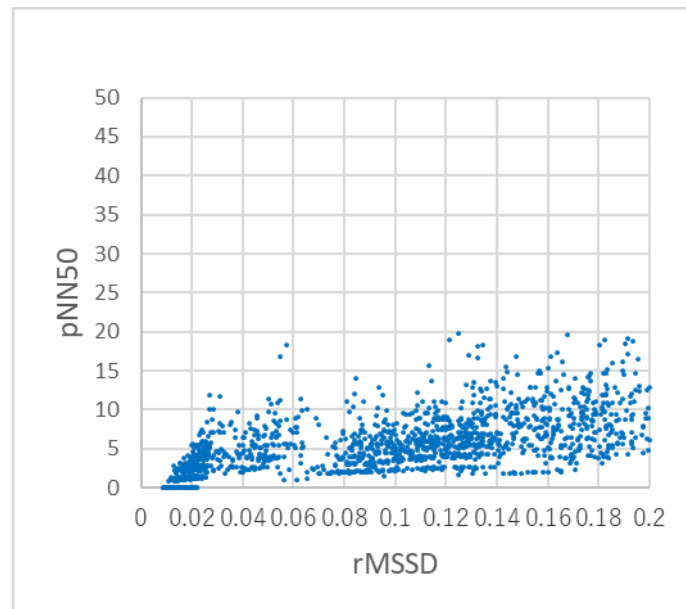


図 6.40 オペレーター4 番 迷走神経量の分布

図 6.41 に示すように 1 番オペレーターより縦軸の CVRR 領域に多く分布しているが、LF/HF の数値が高い領域にも多く存在する。

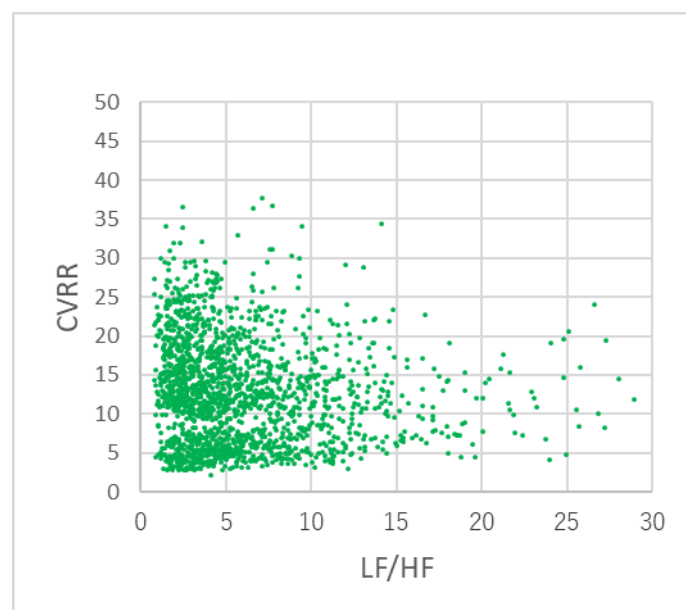


図 6.41 オペレーター4 番 ストレスと迷走神経の活動性

図 6.42 に示すように 4 番オペレーターの場合、耐性領域に他のオペレーターたちより数値がたくさん分布するということを確認することができる。

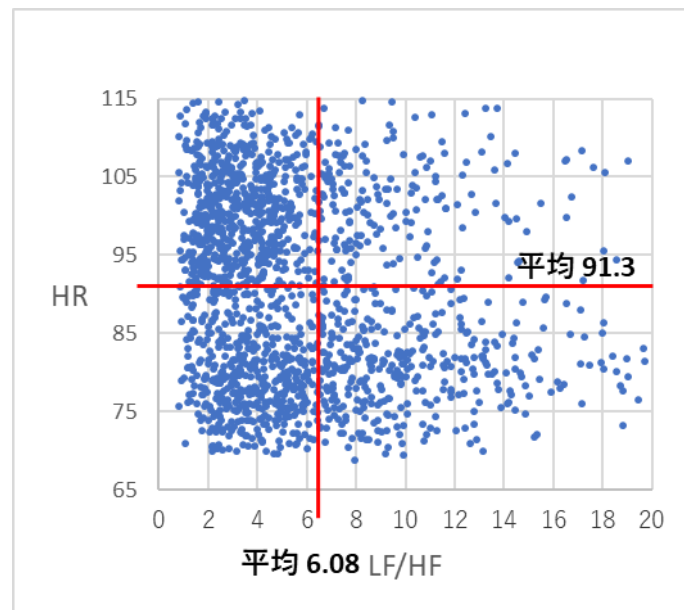
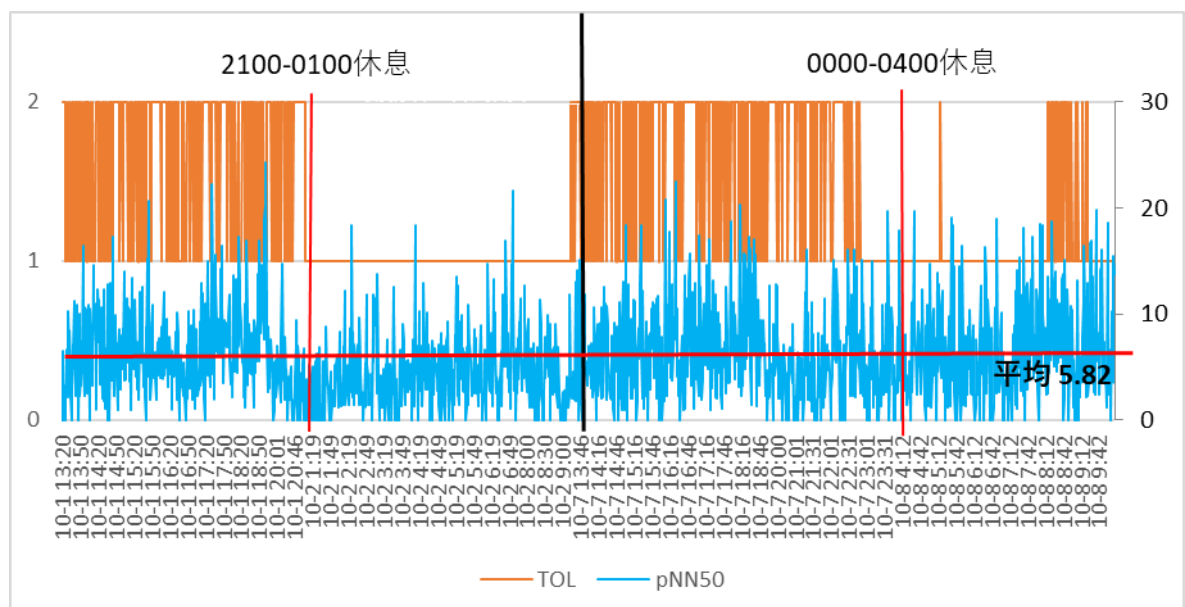


図 6.42 オペレーター4 番 耐性領域

図 6.43 に示すように pNN50 の場合で 4 番オペレーターは耐性領域の時に平均以上の数値を記録して確実な相関関係を表した。特に、休息後には耐性領域が非常に小さかったが、迷走神経の緊張度には変わりがないということである。また、午前 0 時以前の休息では休息後の耐性領域が午前 0 時以降に休息をした場合より耐性領域のほうが小さかった。

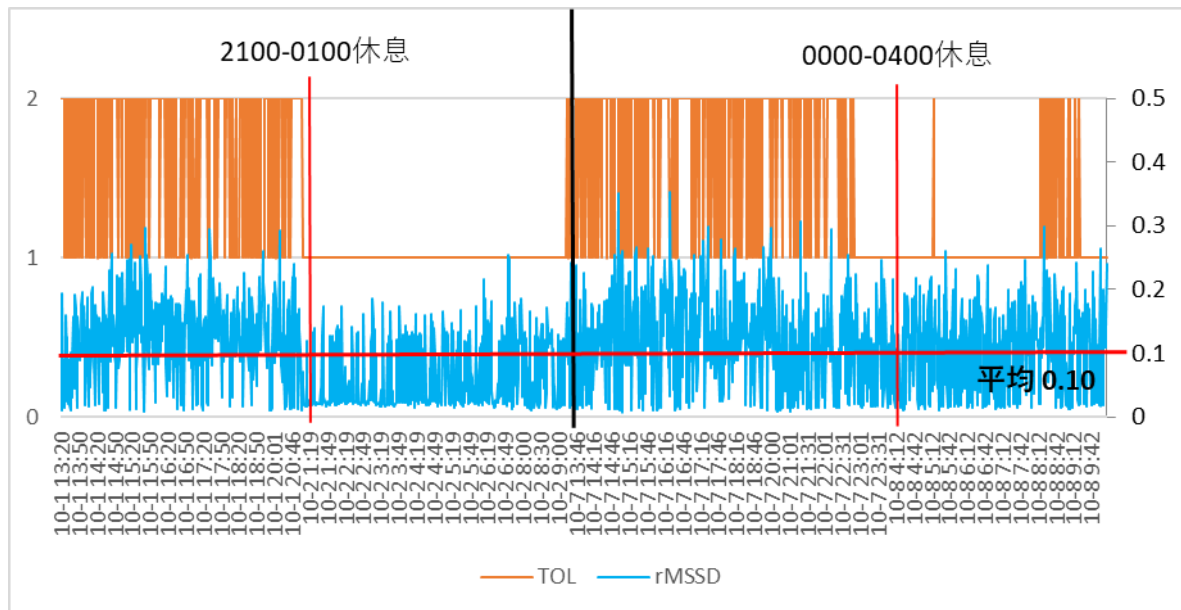


※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：pNN50 (%)，横軸：測定時刻

図 6.43 オペレーター4 番 耐性領域における pNN50 の変化



図 6.44 に示すように rMSSD でも pNN50 と類似した結果が得られた。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.44 オペレーター4番 耐性領域における rMSSD の変化

### 6.10.5 5 番オペレーター

図 6.45 に示すように 5 番オペレーターは大体的に数値が広がっており、相対的に高い領域に分布していて心拍変動性が高いと解釈できる。

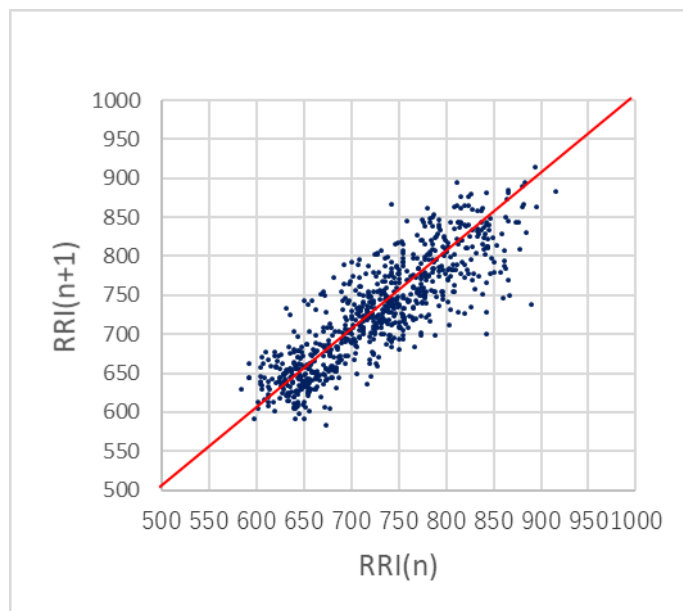


図 6.45 オペレーター5 番 ローレンツプロット

図 6.46 のグラフは交感神経領域に偏っているが、1 番オペレーターよりも  $\ln HF$  が高い領域に分布している。

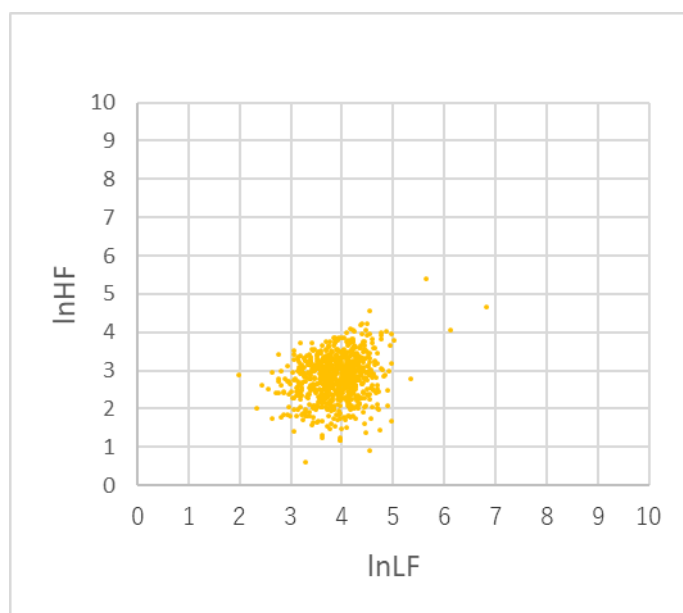


図 6.46 オペレーター5 番 自律神経のバランス

図 6.47 のグラフは 2 番オペレーター の形と似ている。rMSSD と pNN50 が密集された軸が現れて rMSSD 領域に広がっている。迷走神経の緊張度が高いと解釈ができる。

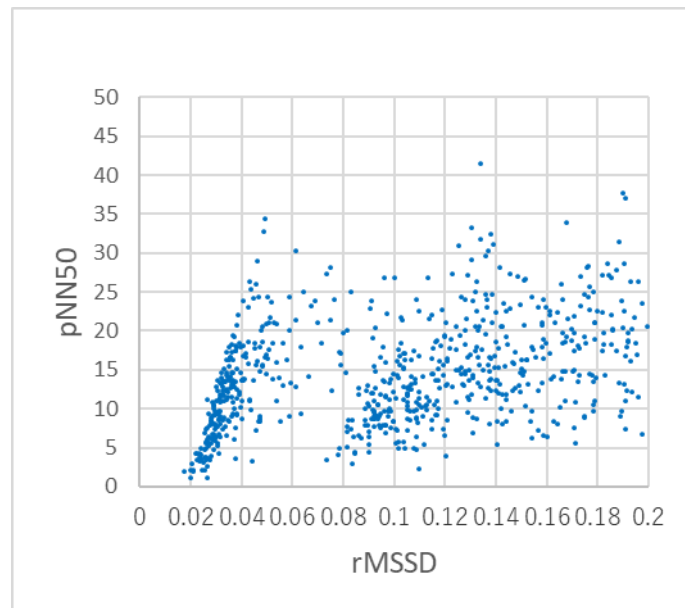


図 6.47 オペレーター5 番 迷走神経量の分布

図 6.48 のグラフも 2 番オペレーター のグラフより LH/HF 値は低いが、CVRR 値は高い。い。

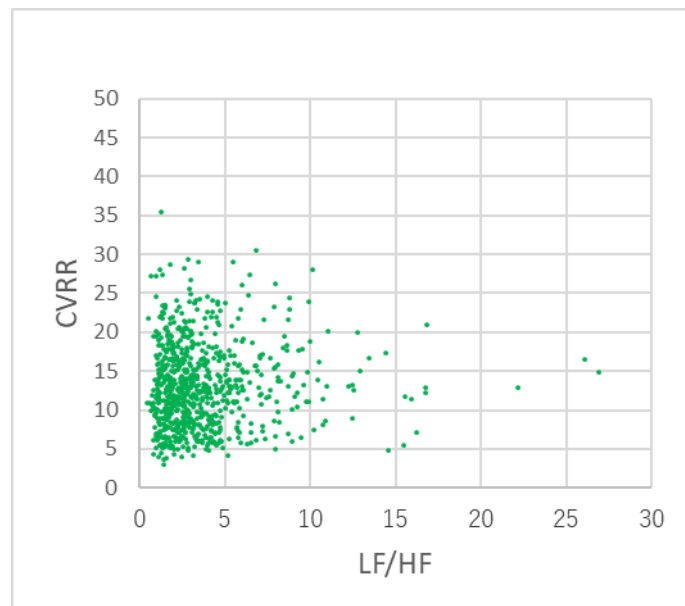


図 6.48 オペレーター5 番 ストレスと迷走神経の活動性

図 6.49 に示すように 5 番オペレーターは、すべての領域で均一な分布を示している。

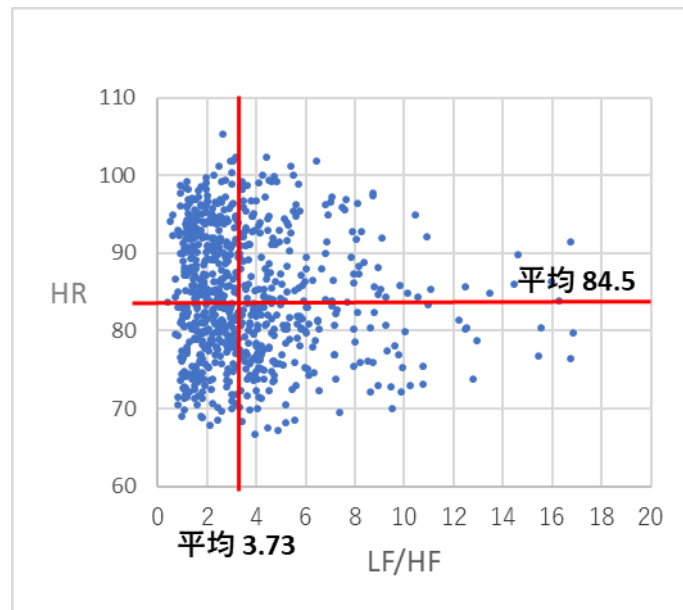
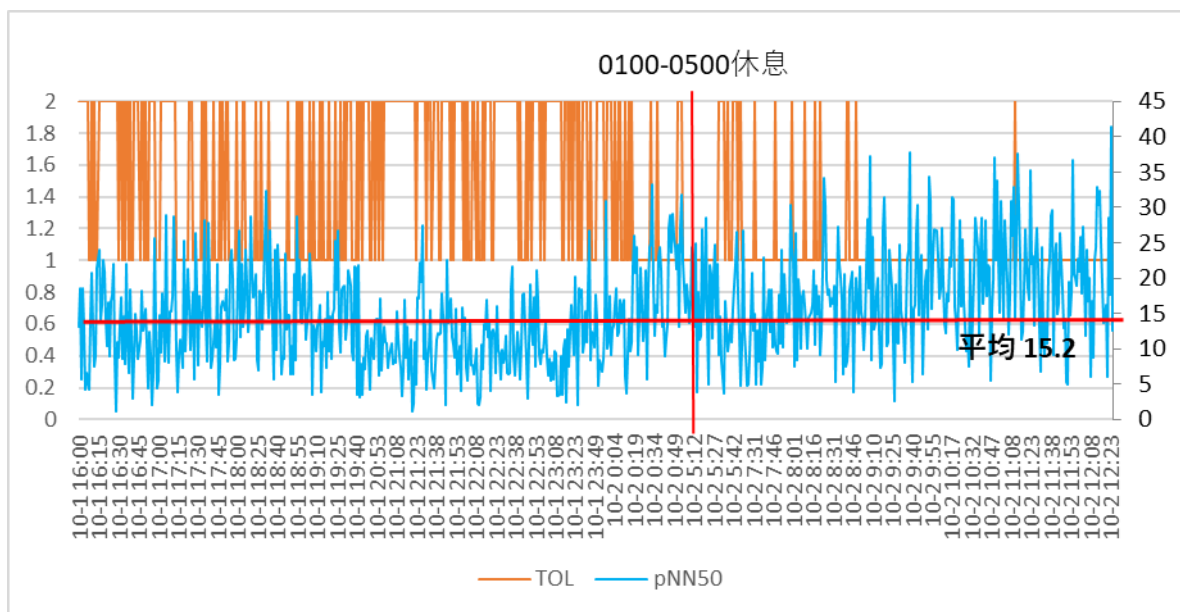


図 6.49 オペレーター5 番 耐性領域

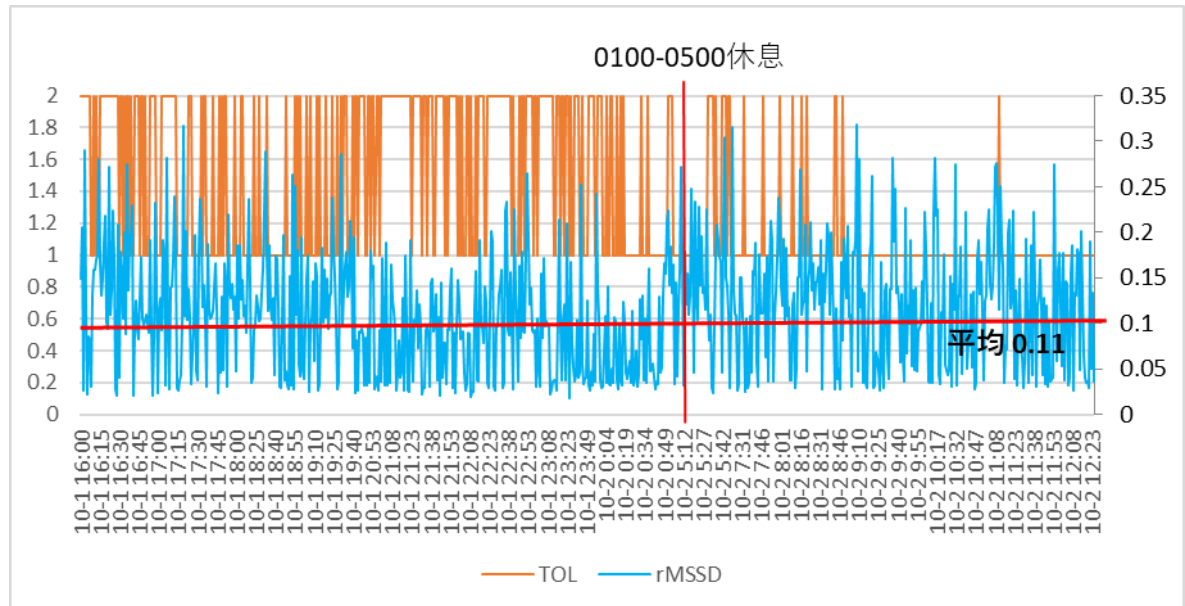
図 6.50 に示すように 5 番オペレーターは pNN50 と耐性領域の関係で最も密接な相関性を表した。pNN50 の数値が、平均以上のときには耐性領域に該当し、そうでない時には大体的に耐性領域に該当されなかった。また、概ね昼が夜より迷走神経の緊張度が高く、退勤に近づくほど耐性領域は減るものの、迷走神経の緊張度は高まることが確認できた。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：pNN50 (%), 横軸：測定時刻

図 6.50 オペレーター5 番 耐性領域における pNN50 の変化

図 6.51 に示すように rMSSD では pNN50 の場合よりは相関関係が低かったが、数値が急激に上昇をすれば耐性領域に該当していることを確認することができた。また、真夜中以降の休憩の後、数値の急激な上昇を見せてもらって、pNN50 とは別に退勤に近づくほど、数値が減少する傾向を表す。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.51 オペレーター5 番 耐性領域における rMSSD の変化

#### 6.10.6 6 番オペレーター

図 6.52 に示すように 6 番オペレーターは 5 番オペレーターと類似した分布を表した。しかし、分布範囲がより広く、心拍変動性が高いと解釈することができる。

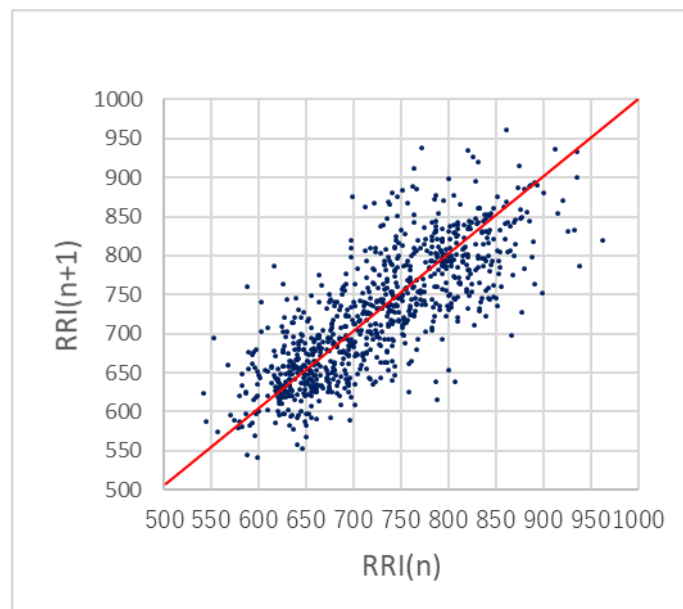


図 6.52 オペレーター 6 番 ローレンツプロット

図 6.53 に示すように 6 番オペレーターも交感神経領域に偏っているが、もっと広く広がっており、縦軸と横軸の両方で高い領域に位置している。

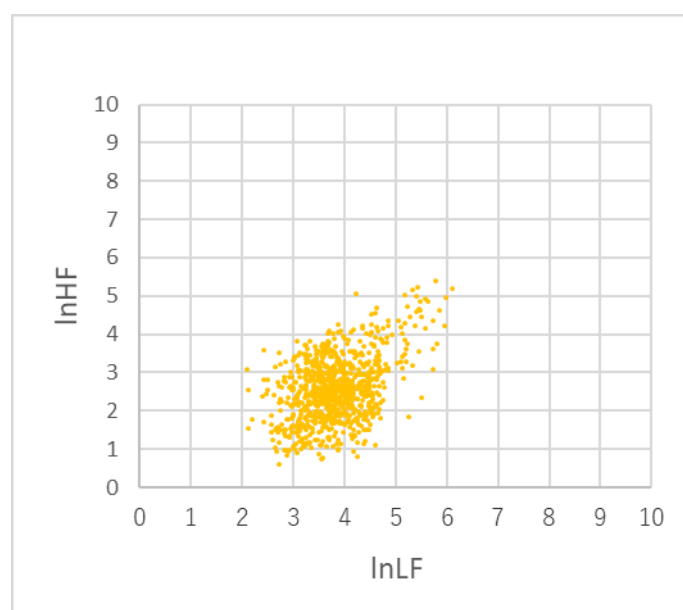


図 6.53 オペレーター 6 番 自律神経のバランス

図 6.54 の迷走神経の緊張度のグラフで 2 番オペレーターに似た形を示している。2 番オペレーターより測定期間が短くてデータの数が少ないが、2 番オペレーターのように縦軸と横軸の密集された線が存在して rMSSD 領域に広く広がっているということを確認することができて迷走神経の緊張度が高いということを示唆する。

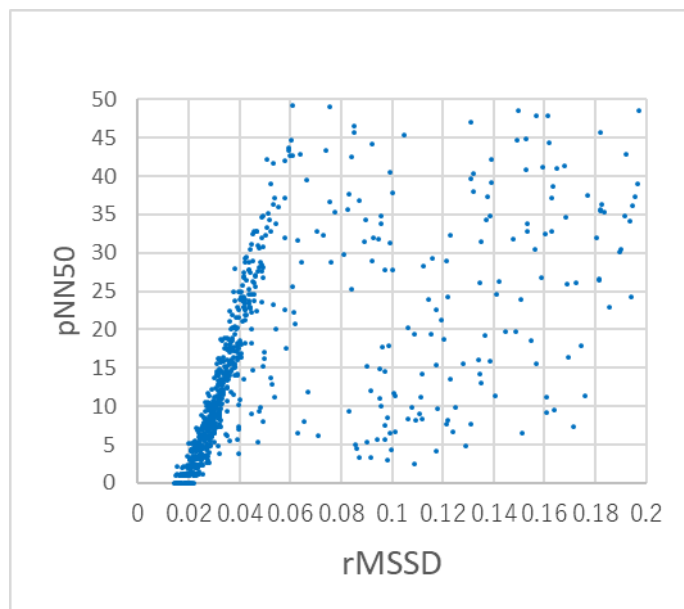


図 6.54 オペレーター6 番 迷走神経量の分布

図 6.55 に示すようにこのグラフも 2 番オペレーターと同様に LH/HF は低い領域に CVRR は高い領域に存在して高い迷走神経の活性度を示している。

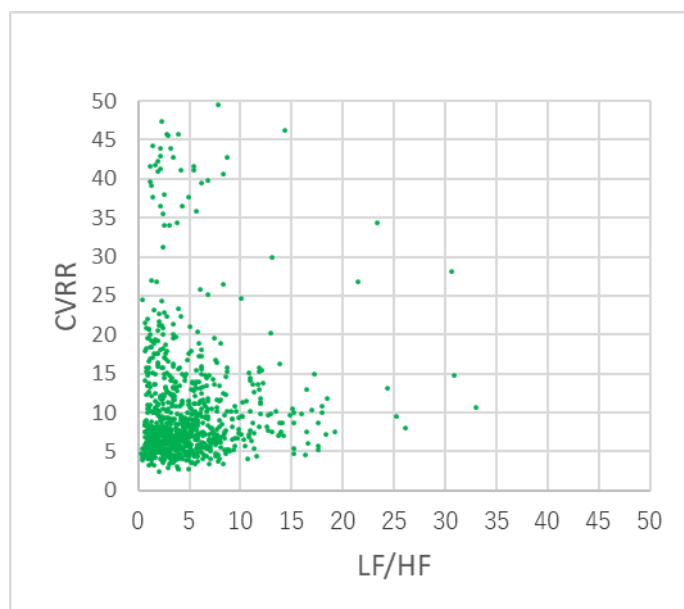


図 6.55 オペレーター6 番 ストレスと迷走神経の活動性



図 6.56 に示すように 6 番オペレーターは休息の領域で高い分布を表す。

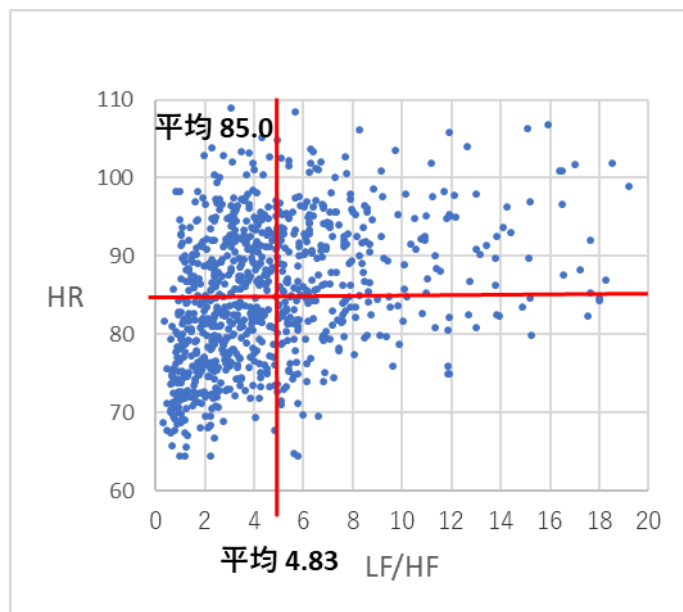
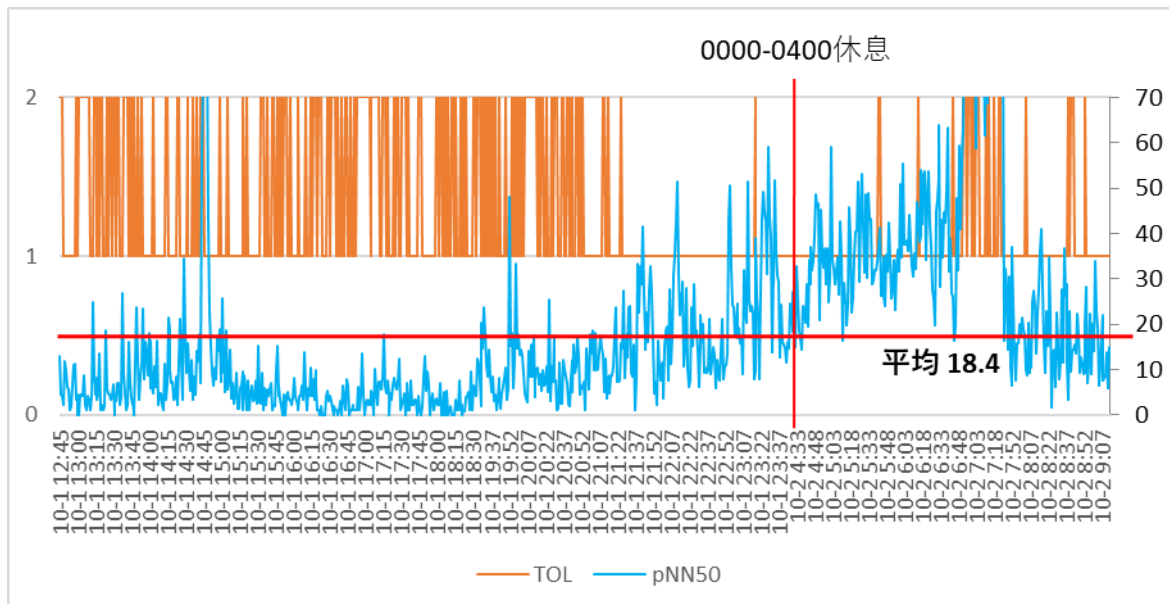


図 6.56 オペレーター6 番 耐性領域

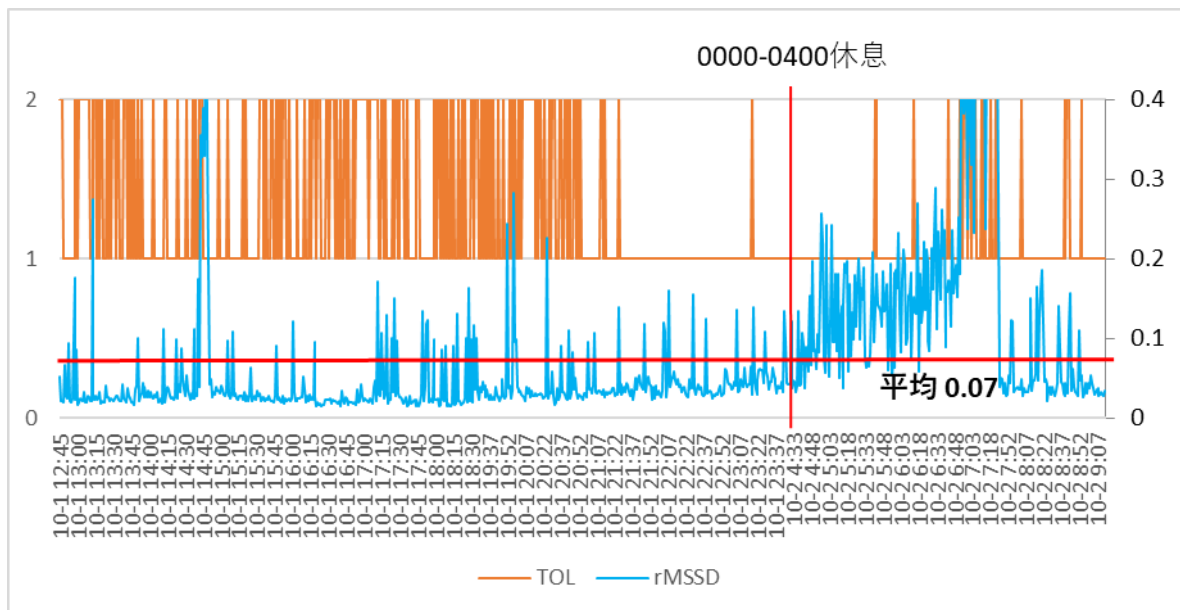
図 6.57 に示すように 6 番オペレーターは夜と早朝の時間には耐性領域が小さく、pNN50 が平均以下であった場合に耐性領域に該当される場合が多くて耐性領域と迷走神経の緊張強度との相関関係が低かった。6 番オペレーターは夜と早朝の時間には耐性領域が小さく、pNN50 が平均以下であった場合に耐性領域に該当される場合が多くて耐性領域と迷走神経の緊張強度との相関関係が低かった。また、昼夜を問わず、迷走神経の緊張は続き、退勤前に減少する傾向を表す。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：pNN50 (%)，横軸：測定時刻

図 6.57 オペレーター6 番 耐性領域における pNN50 の変化

図 6.58 に示すように rMSSD との比較でも pNN50 と似たような形を表す。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.58 オペレーター6 番 耐性領域における rMSSD の変化

#### 6.10.7 7番オペレーター

図 6.59 に示すようにオペレーター7 番は最も低い心拍変動性を示している。数値が広く広がらず密集しており、位置も低い数値に存在する。これは心拍変動性が低いだけでなく、心拍の変動を起こす力も弱いと解釈することができる。

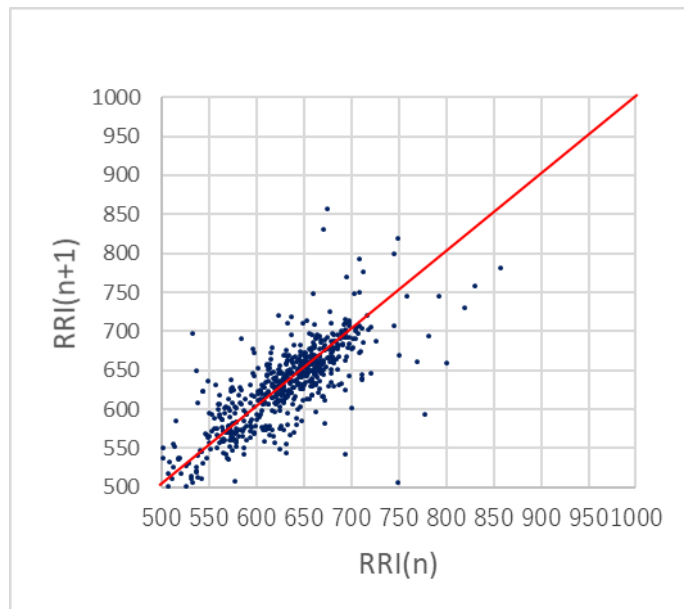


図 6.59 オペレーター7 番 ローレンツプロット

図 6.60 に示すように 7 番オペレーターは他のオペレーターのように交感神経に偏っているが、 $\ln\text{LF}$ 、 $\ln\text{HF}$  の数値がともに高い領域が存在するということを知ることができる。

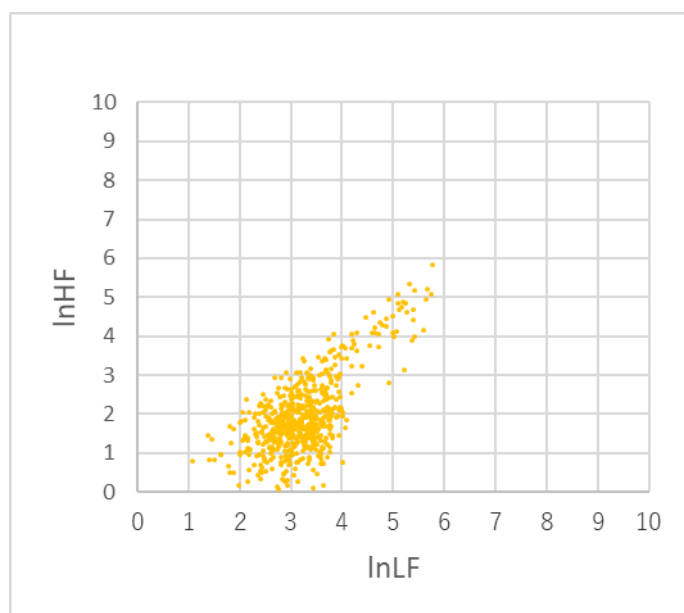


図 6.60 オペレーター7 番 自律神経のバランス

図 6.61 に示すように迷走神経緊張の度合いも勤務経歴や年齢が高い 4 番オペレーターと非常に類似した形態を表した。縦軸と横軸の密集された部分がなく、pNN50 が低い領域から rMSSD の高い領域に広がっている。

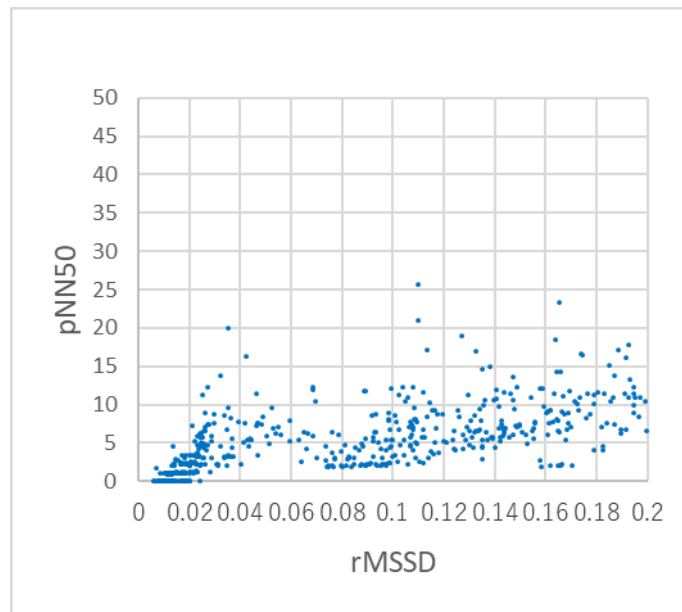


図 6.61 オペレーター7 番 迷走神経量の分布

図 6.62 に示すようにしかし、迷走神経活性度では 6 番オペレーターに劣らない低い LF/HF 数値と、高い CVRR 数値を表した。

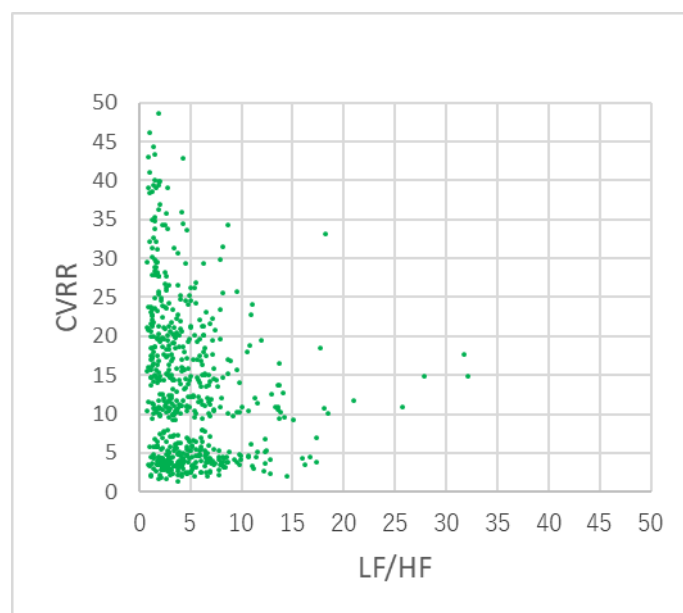


図 6.62 オペレーター7 番 ストレスと迷走神経の活動性

図 6.63 に示すように 7 番オペレーターは主に心拍数とストレスがいずれも低い領域に数値が分布していた。

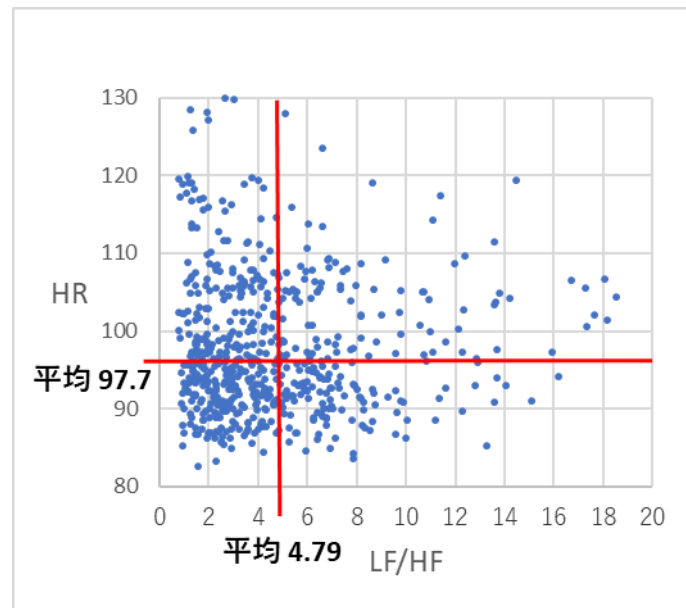
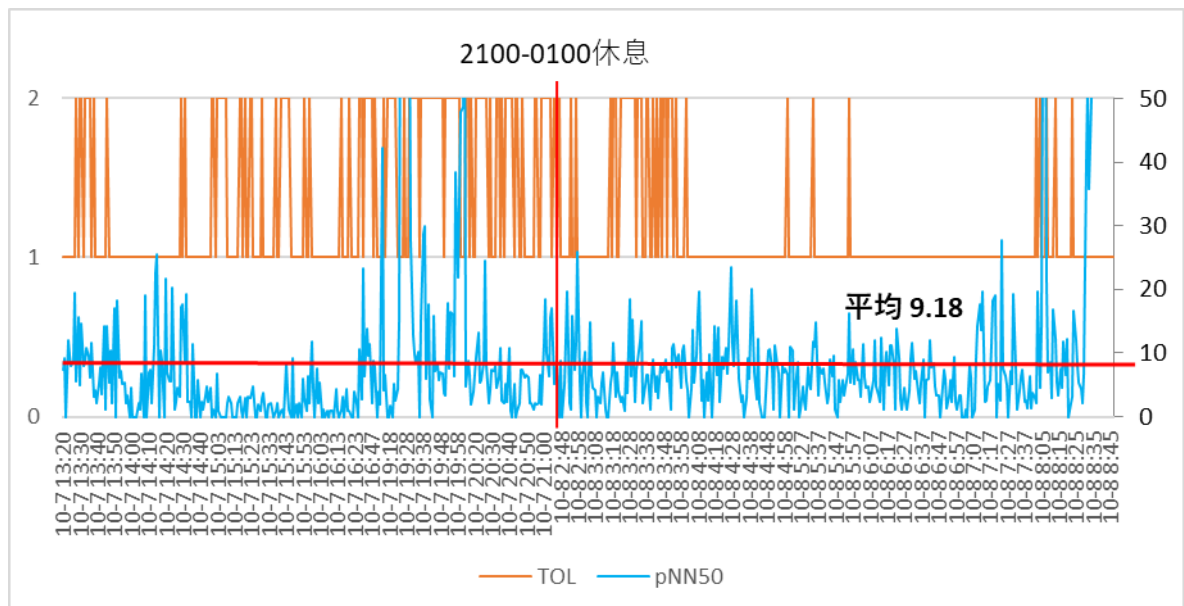


図 6.63 オペレーター7 番 耐性領域

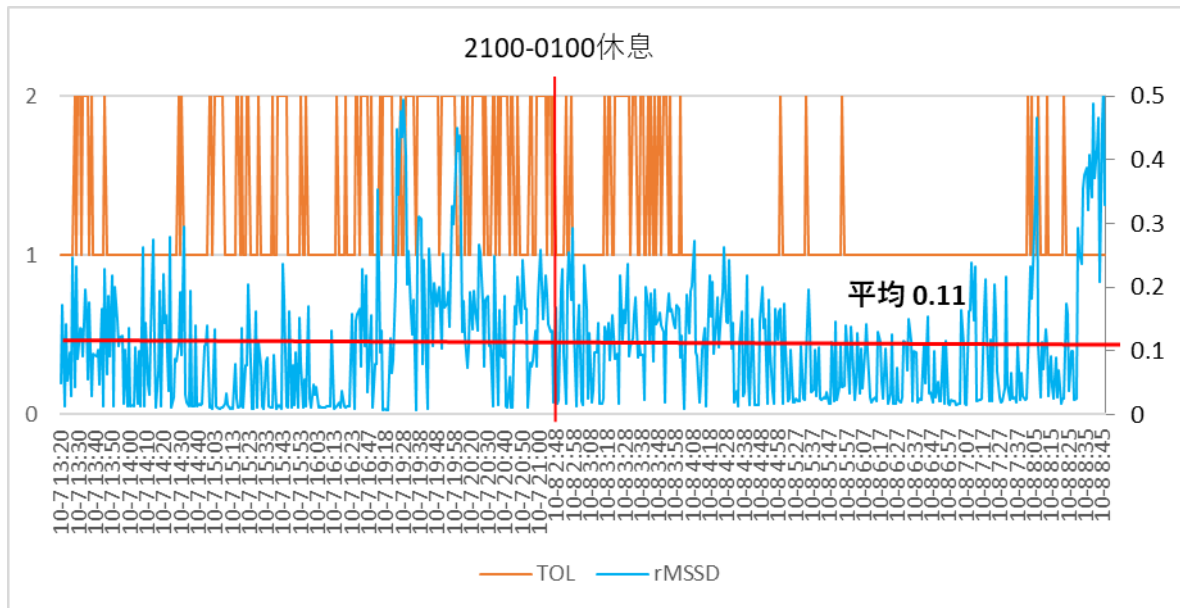
図 6.64 に示すように 7 番オペレーターの pNN50 の数値は平均以下だが、耐性領域に該当する時が多くて pNN50 の数値と耐性領域の相関関係が低いと解釈できる。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：pNN50 (%)，横軸：測定時刻

図 6.64 オペレーター7 番 耐性領域における pNN50 の変化

図 6.65 に示すように rMSSD 数値と耐性領域との相関関係は高かった。これは 7 番オペレーターの場合、pNN50 の数値は低い、rMSSD の数値は高いと推測される。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.65 オペレーター 7 番 耐性領域における rMSSD の変化

#### 6.10.8 8 番オペレーター

図 6.66 に示すように 8 番オペレーターは 5 番オペレーターより高い領域で数値が密集されていて心拍変動の力が高いと解釈できる。

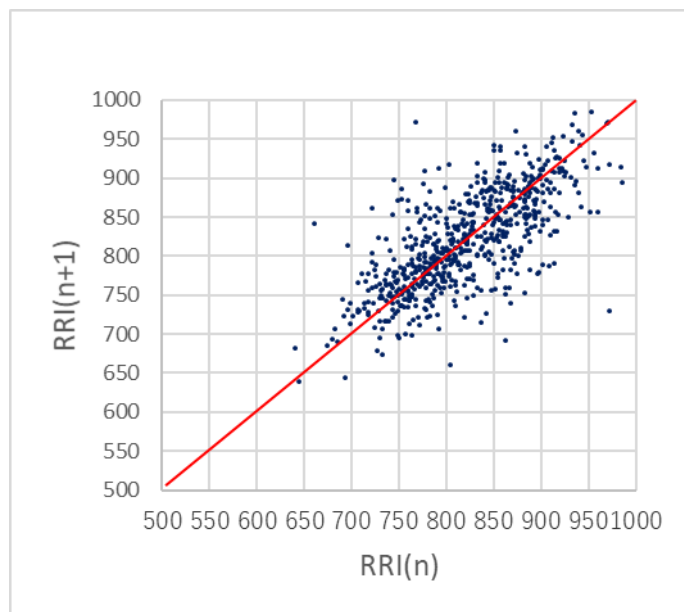


図 6.66 オペレーター8 番 ローレンツプロット

図 6.67 に示すように 8 番オペレーターは最も高い領域に数値が密集している。1 番オペレーターと違うように円の形に密集されておらず、右上段の領域に偏っている。交感神経と副交感神経がどちらも亢進していることを表す。

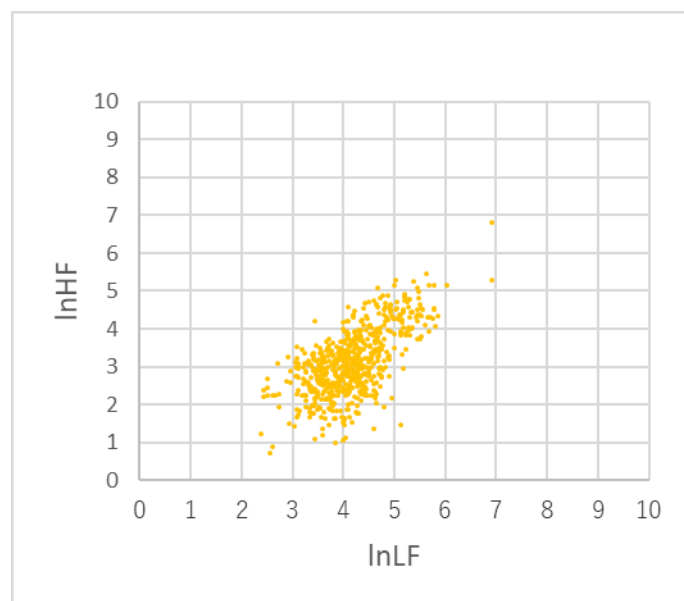


図 6.67 オペレーター8 番 自律神経のバランス



図 6.68 に示すように迷走神経緊張の強度も交代勤務耐性が高い 2 番オペレーターに似た形を表す。

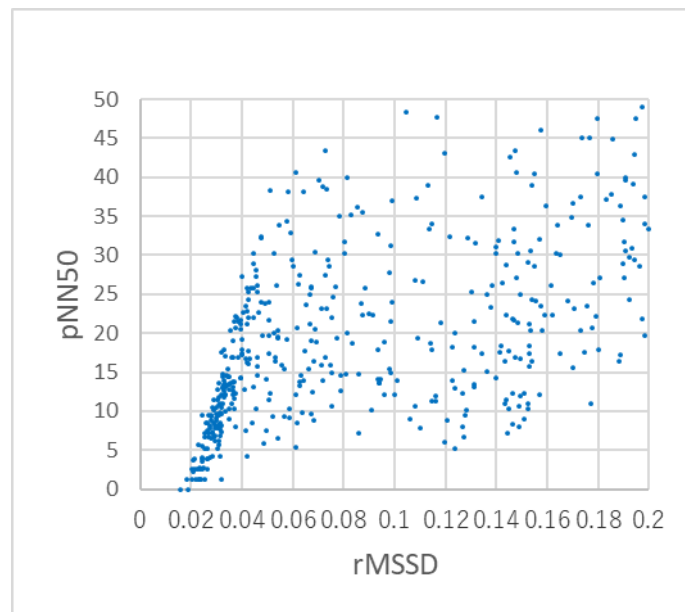


図 6.68 オペレーター8 番 迷走神経量の分布

図 6.69 に示すようにストレス数値は低く、迷走神経の活性度は高い領域に位置して 1 番オペレーターのグラフと反対の形を表す。

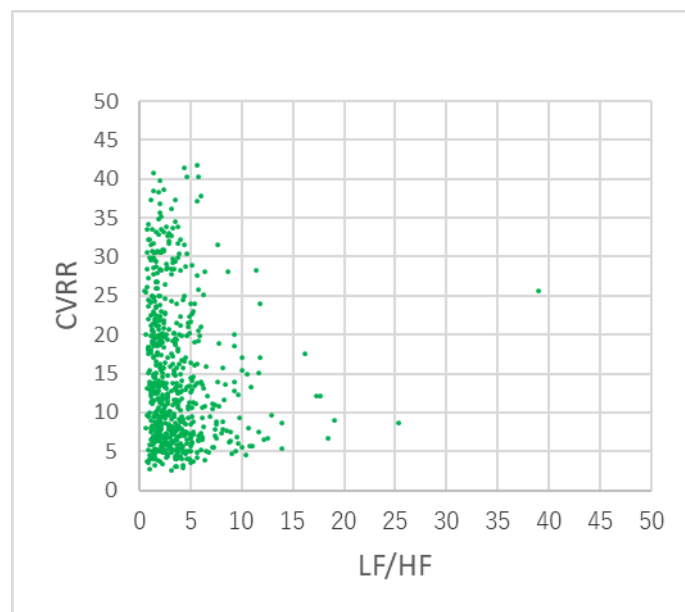


図 6.69 オペレーター8 番 ストレスと迷走神経の活動性

図 6.70 に示すように 8 番オペレーターは過覚醒、低覚醒領域より耐性領域に存在する数値が多い。

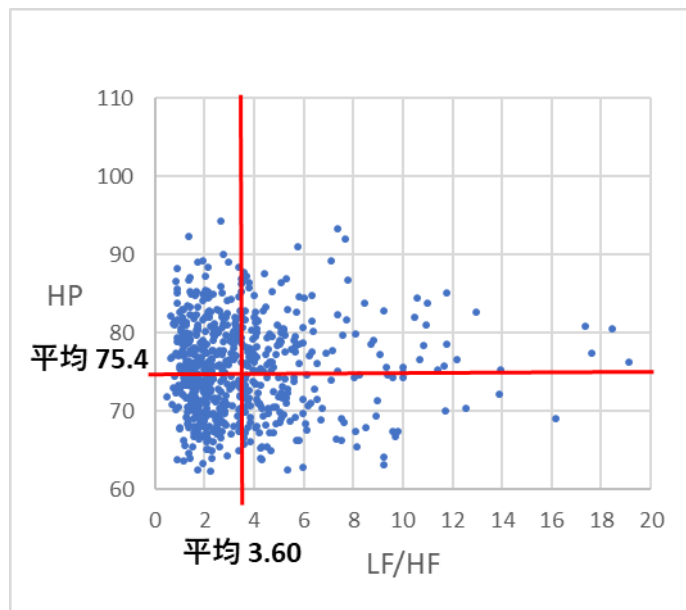
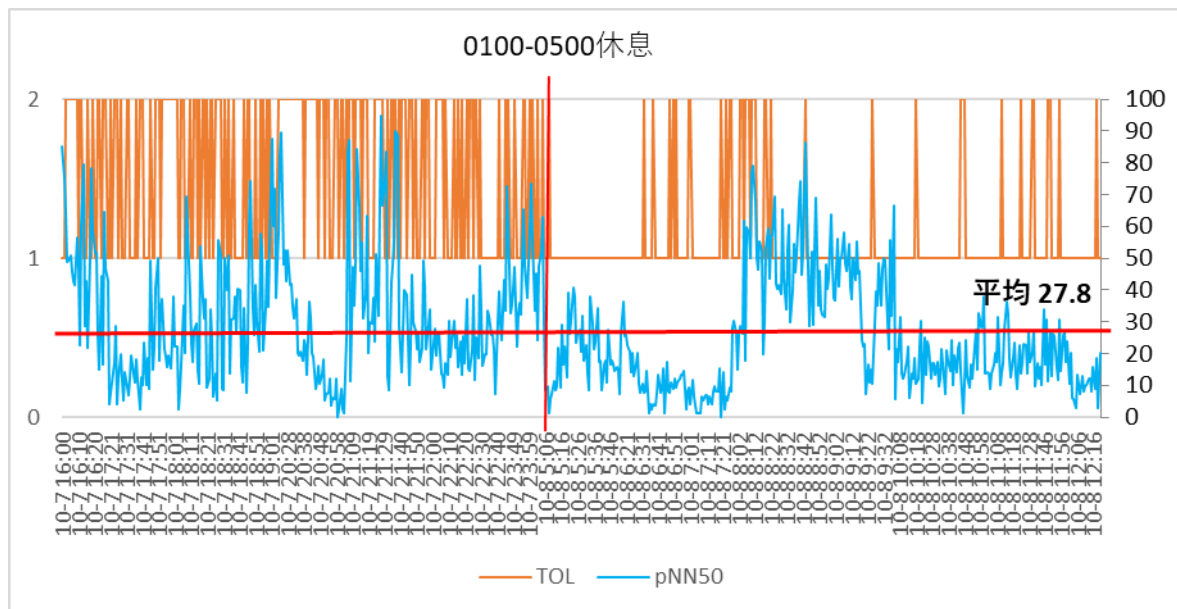


図 6.70 オペレーター8 番 耐性領域

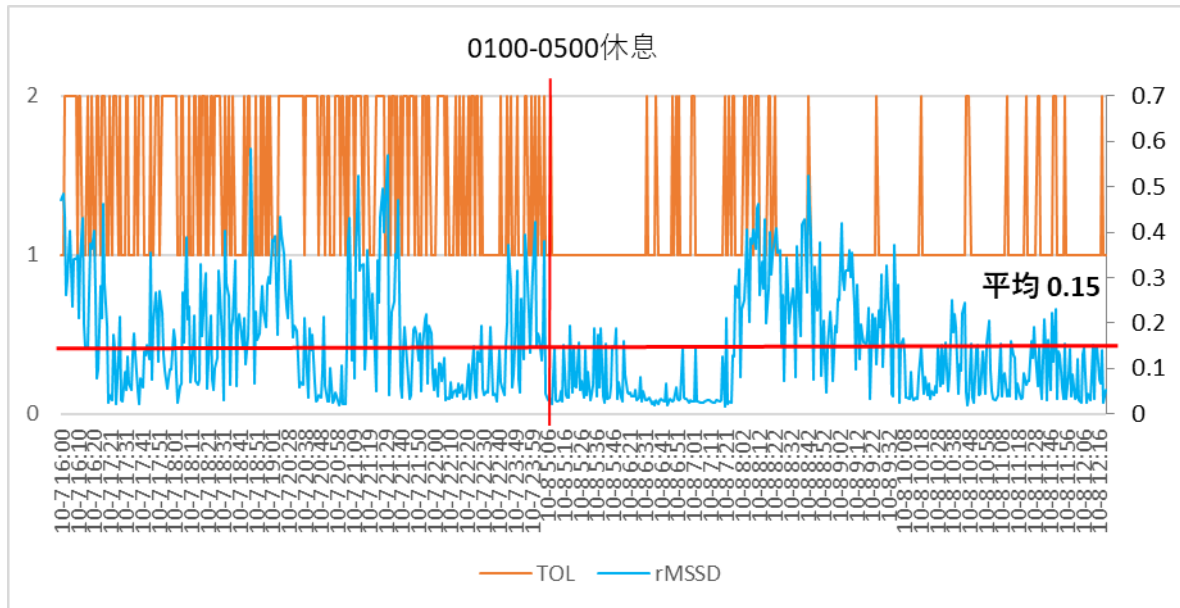
図 6.71 に示すように耐性領域と pNN50 は大体的に相関関係を示したが、pNN50 の数値が、平均以下であるにも耐性領域に該当する場合があった。また、耐性領域は休息前によく現れたが、休息後に再び耐性領域が到達するまで時間がかかった。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し、2-耐性領域該当、右縦軸：pNN50 (%), 横軸：測定時刻

図 6.71 オペレーター8 番 耐性領域における pNN50 の変化

図 6.72 に示すように rMSSD は pNN50 より耐性領域と有意義な相関関係を示した。



※ 左縦軸：1-耐性領域無し，2-耐性領域該当，右縦軸：rMSSD(ms)，横軸：測定時刻

図 6.72 オペレーター8 番 耐性領域における rMSSD の変化

## 6.11 時系列と周波数系列データの比較によるデータの信頼性分析

前述のように SDNN は TP と、NN50 や pNN50 は HF と数学的、生理学的に高い相関度を示して似たような様相を見せるようになる<sup>(31)</sup>。

8 人のオペレーターのデータは周波数系列と時系列のデータとして存在する。データの信頼性の確保のために測定されたデータ間の比較をおこなってであった。互いに計算上の関連があるか、計算方式は異なるが、似たような結果が出るべきデータの様相を分析した。

分析は比較的交代勤務耐性が高いと考えられ、好対照群と考えられる 8 番オペレーターのデータを活用した。図 6.73 に示すように最も明確に心拍変動を示す SDNN と自律神経の全体的な活動量を示す TP の変動がほぼ同じ様相である。TP が高い状態、すなわち、疲労せず活力的な状態では心拍変動度が高くて健康な状態と言え、疲労を示唆する TP が低い状態では SDNN も低く、心拍変動度も低くなると考えられる。

また、休息後に身体の活力がすぐに改善するのではなく、一定な時間が過ぎた後に活性化することが把握できた。

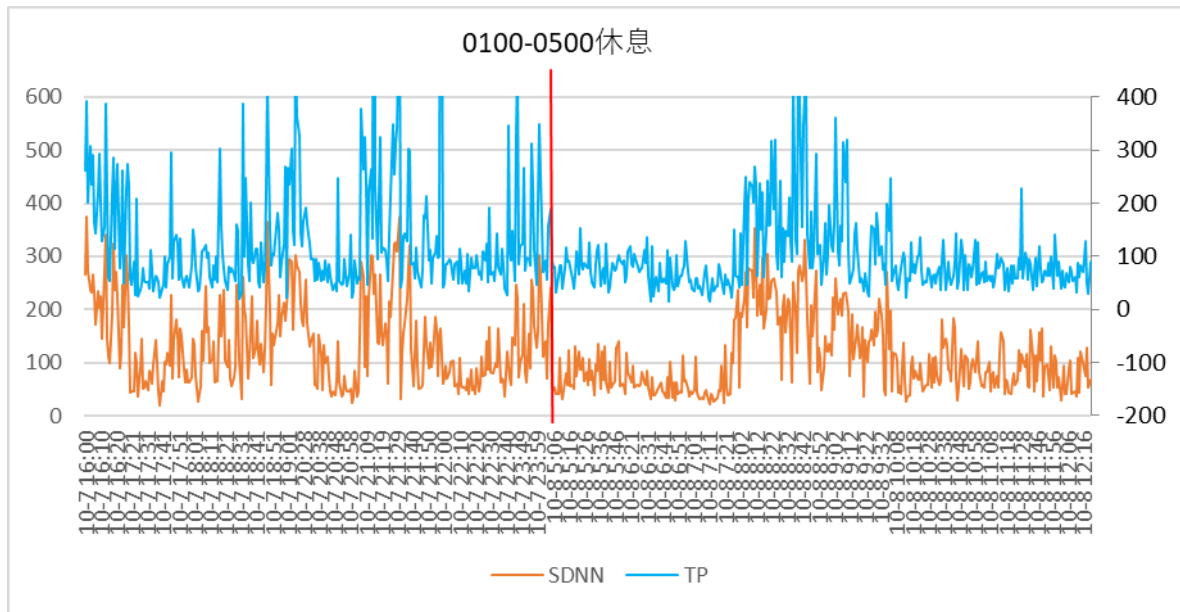


図 6.73 オペレーター8番 SDNN と TP

図 6.74 に示すように周波数系列データの  $\ln HF$  と時系列データの  $pNN50$  も非常に類似した形態を表してデータ間の信頼性を確認することができた。

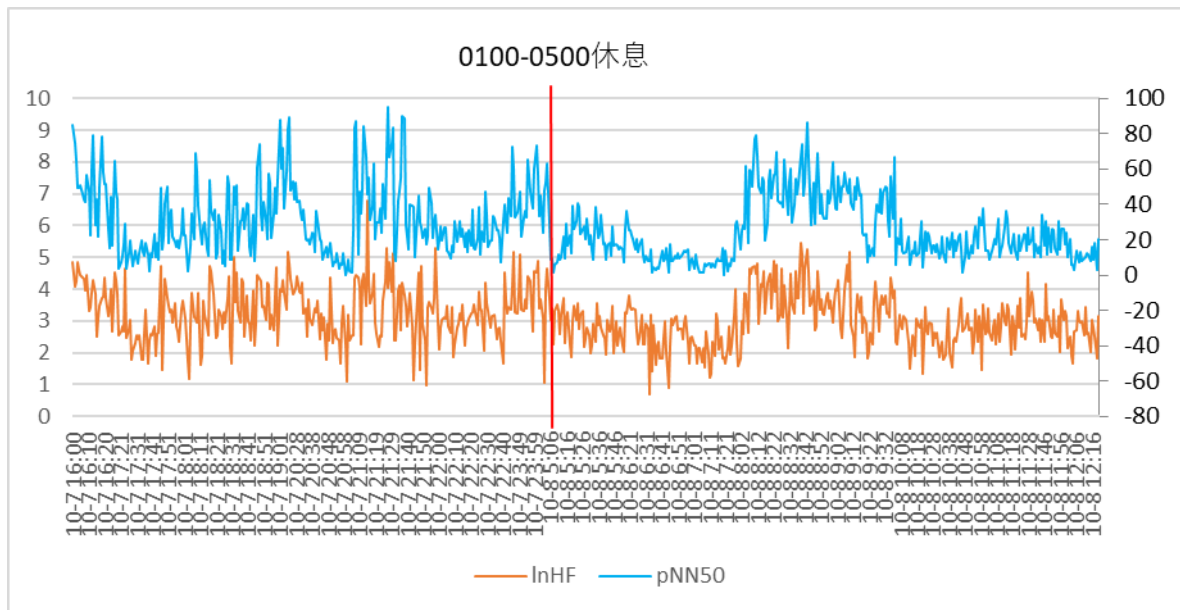


図 6.74 オペレーター8番  $\ln HF$  と  $pNN50$

図 6.75 に示すように周波数系列の指標である TP と時系列の指標である  $pNN50$  の比較である。お互い違う計算方式を持った指標のデータであるが、変動の様相が非常に類似しているということを把握することができ、迷走神経の緊張度を示す  $pNN50$  が高い時に全体の自律神経量を示す TP の増加を表すので、測定における信頼性を確認することができ、休憩の後、自律神経の活動が、まさに回復になることではなく勤務をしながら、活性化されることも確認することができた。

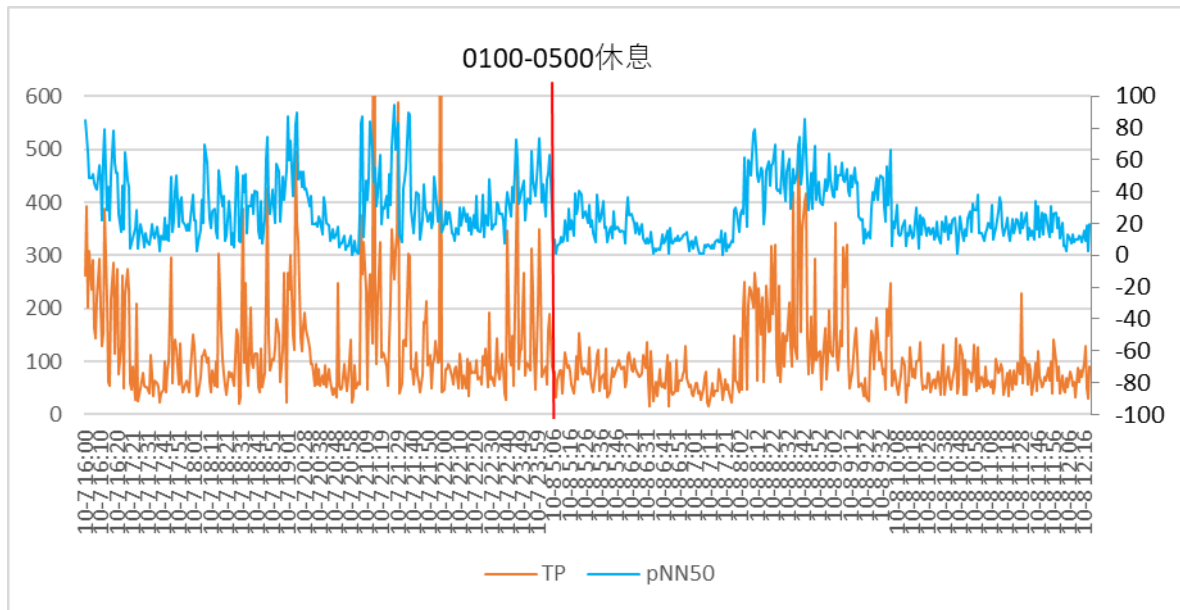


図 6.75 オペレーター8番 TP と pNN50

図 6.76 に示すように CVRR は SDNN のデータとして計算され、CCVTP は TP のデータを使って計算するので、CVRR と CCVTP はほぼ同じ変動を示した。これは、図 6.75 の結果のように SDNN と TP が似たような様相を呈していることから、それを用いて計算した結果でも信頼性を持っていることを示唆する。そして、迷走神経の活動度を示す CVRR と自律神経機能を示す CCVTP が似た意味を持つことを表す。つまり、迷走神経の活動度が高ければ、全体の自律神経機能も上昇することを意味するといえる。休息後に副交感神経の活動度が低くなったが、朝 8 時頃忙しくなって増加した。

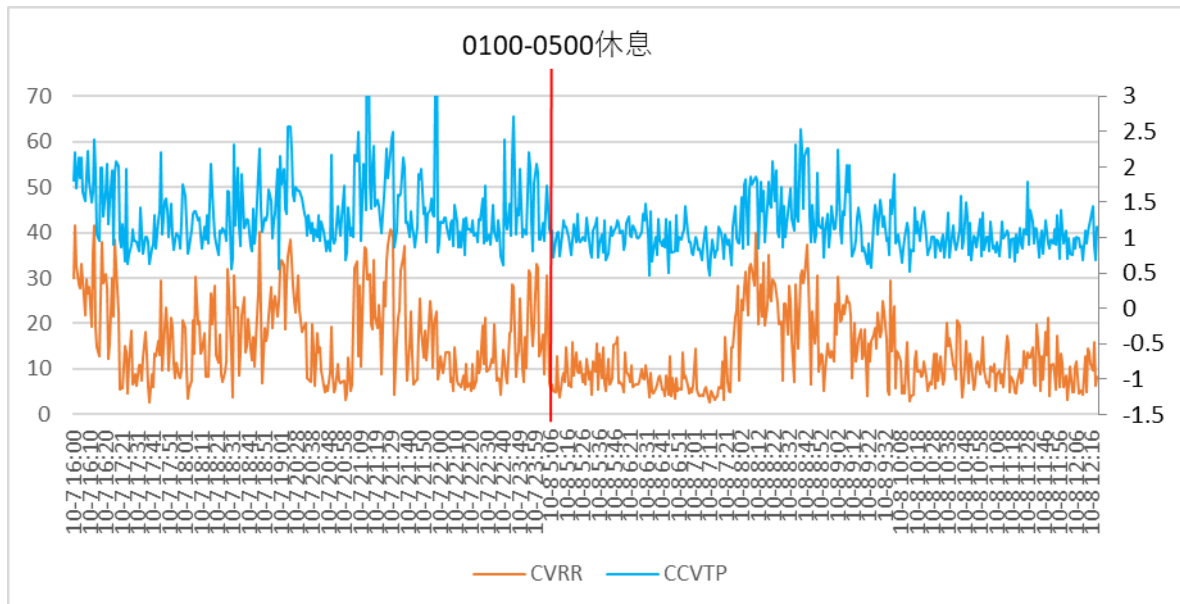


図 6.76 オペレーター8番 CVRR と CCVTP

図 6.77 に示すように迷走神経の緊張の大きさを表わす rMSSD と pNN50 のデータも類似し

ているというを確認することができる。pNN50 は rMSSD と HF power とともに副交感神経活動と密接な関連がある。SDNN より副交感神経の影響をより大きく受けるため、短期 SDNN より信頼できる指数である<sup>(14)</sup>。

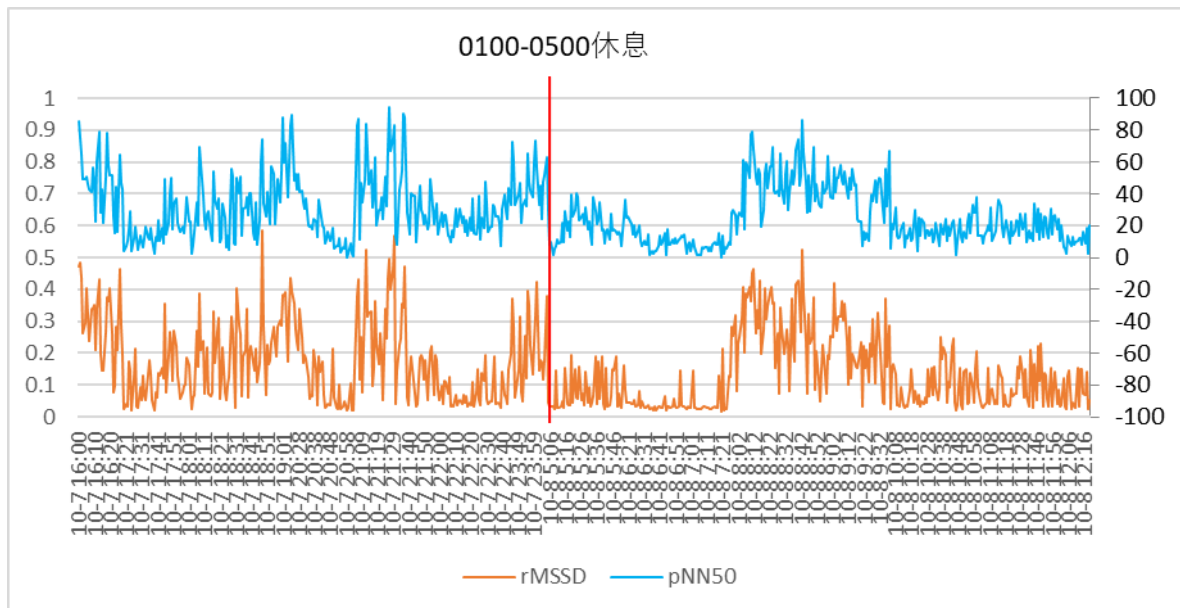


図 6.77 オペレーター8番 rMSSD と pNN50

図 6.78 に示すように心拍の間隔の標準偏差である SDNN と心拍間隔の差が 50msec より大きい場合の割合である pNN50 のお互いに類似した形態を表す。これは、心拍間隔の標準偏差を発生させる心拍変動に 50msec より大きい場合の RRI が寄与していることを示唆する。

このように計算方式が異なる時系列と周波数系列の指標である SDNN と TP、pNN50 と HF との相関関係があることを実際の導出されたデータの分析を通じて確認できた<sup>(31)</sup>。

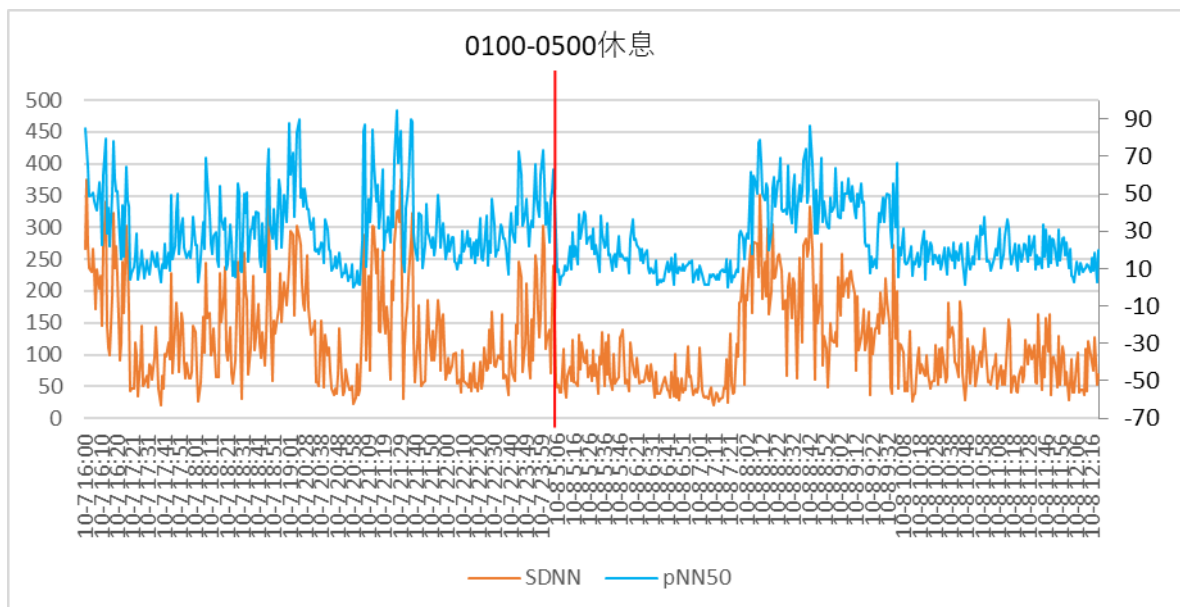


図 6.78 オペレーター8番 SDNN と pNN50



## 6.12 結語

(1) 日周期リズムと出退勤時のストレスと疲労の分析結果をまとめてみると、1、2番オペレーターの結果から判るように真夜中以降の休息は退勤時に TP 値の損傷が小さかったが、連続した勤務から退勤時のストレスの増加を示した。逆に、真夜中以前の休憩を取った場合、TP 値の損傷が大きく、退勤時の疲労は大きいことを示したが、連続した交代勤務での退勤時のストレスは減少する傾向を示した。

(2) 4番オペレーターの場合は真夜中以降の休憩を取った場合がストレスや疲労度が低いことを確認された。そして日勤の3番オペレーターと交代勤務者である2番オペレーターを比較してみると、普段に交代勤務をして一日だけ日勤勤務をした2番オペレーターの数値は交代勤務をした時より、退勤時に心拍数とストレス数値は低い、疲労度はより高いことを表す。しかし、日勤勤務のみを継続した3番オペレーターは絶対的な TP の値が低い、連続する日勤勤務でストレスは増加して疲れは減少する傾向を表す。

これは田島 多恵子の研究<sup>(57)</sup>(平成30年)のように運動を続けて運動に慣れれば、迷走神経が活性化になるという内容と似たような解釈が可能である。勤務開始の時は負担が高いが、勤務を続けながら勤務に慣れるため、TP 値の損失が減ると解釈できる。

5、6番オペレーターの場合は退勤時が出勤時よりストレスは高かったが、疲労はむしろ減少した。6、8番オペレーターの場合、休憩後に直ちに TP が上昇するのではなく、業務量の増加に伴って TP 値の上昇が示された。

ストレス反応を示す SNS(LF/HF)数値と、ストレスによる損失である疲労が発生すると減少する TP 数値を比較して考えると、即座にではないがストレスが高い場合は概ね TP が低く、ストレスが低い場合は概ね TP の数値が高いことが確認できる。これでストレスによる損失は早くても遅くても TP の損失を誘発することが確認できる。また、休憩後に勤務する初期には自律神経が活性化しない状態でストレスは高く、時間が経つにつれて休息による TP の回復が発生し、ストレスの減少が発生することが確認できる。

(3) 耐性領域と迷走神経緊張度との比較では真夜中以降に休息を取るほど耐性領域への進入が高く、pNN50 と rMSSD との相関関係が高いという解釈が可能だった。そして、図 6.43 のように4番オペレーターでの真夜中以降に休息を取る場合、耐性領域が拡大と解釈できる結果が得られた。また、全体指標の平均値を表す表 6.1 と6番オペレーターの耐性領域の相関関係を示す図 6.57、6.58、7番オペレーターの耐性領域の相関関係を示す図 6.64、6.65 を比較してみると、7番オペレーターのデータで数値が高い rMSSD との相関関係は高かったが、数値が低かった pNN50 では相関関係が低くて数値が高い変数と相関関係が高いと推定できるが、7番オペレーターと反対のデータを示した6番オペレーターの場合、二つの変数いずれも相関関係が低い結果が現れたので高い数値を示す指標の相関関係が高いと解釈できない。

概ね交代勤務耐性が高いか、真夜中以降に休憩を取ったオペレーターの相関関係が高かった

が、変動幅が大きく、個人差が大きく定量的に数値化することは不可能だった。

(4) 6番オペレーターは女性として勤務経歴は1年で24歳の比較的若い年齢だが、7番オペレーターは男性であり、勤務経歴が12年、年は31歳で6番オペレーターより比較的に年長である。目につくのは、交代勤務耐性を示唆する迷走神経の緊張の度合いを表す pNN50 と rMSSD から完全に反対の結果が出たものである。

6番オペレーターは、短期的な迷走神経の緊張強度を示す rMSSD 数値は低いが、pNN50 の数値は高かった。そして7番オペレーターはこれと反対だった。勤務経歴が短く、年齢が低いほど短期間の交代勤務耐性は低い反面、長期的な耐性は高いことを示唆した。すなわち、即時のストレスへの対応は低いが、長期的な回復能力は高いと解釈できる。そして7番オペレーターのように勤務経歴や年齢が高まるほど、短期的なストレスに対する対応は良くなるが、長期的な回復と関連される交代勤務耐性は低くなると解釈できる。これと関連して迷走神経の活性度を示す CVRR の数値も6番オペレーターは低い、7番オペレーターは高い。また、pNN50 と rMSSD の不一致を見せている2、3、4、5番オペレーターらも CVRR と rMSSD はいつも似たような様相を表す。これにより、CVRR は短期的な交代勤務耐性を示す rMSSD と相関関係があると言える。

(5) 性別としての分析は Fred Shaffer and J. P. Ginsberg の論文<sup>(14)</sup>(2017)で女性が高い心拍数に副交感神経が優位を、男性は低い心拍数に交感神経の優位を見せたとされているが、本研究での測定結果は性別による違いを発見することができなかった。その他の交代勤務耐性を示唆する指標でも性別による意味がある数値の差は見つからなかった。むしろ、交代勤務の耐性においては、生活習慣や勤務経歴、年齢がさらに大きな影響を与えることが分かった。特に、年を取るにつれて減少する TP と HF の数値からも勤務経歴と年齢による減少が見つかり、HF より TP で確実な減少を表した。

(6) 交代勤務耐性の基本的な数値が比較的高くない6番オペレーターのグラフ分析では交代勤務耐性が高い2、5番オペレーターのグラフと似た形が多く発見された。これは交代勤務耐性に影響を与える心拍変動や迷走神経の緊張強度は年齢の影響を受け、グラフの生体データ上では良い結果となるが、全体的な交代勤務耐性では ISO 原則で説明された業務の熟練度のようなストレスや疲労を軽減できる経験が重要なものと解釈することが可能であった。

(7) また、耐性領域と迷走神経の緊張強度を示す指標の間の相関関係において、交代勤務耐性が高いオペレーターは相関関係が高かったものの、そうでないオペレーターは相関関係が相対的に低かった。これは、迷走神経の緊張がストレスの減少に直接的な影響を与えるほど、交替勤務の耐性が高まることを意味する。逆に、交代勤務の耐性が低いということは、迷走神経が緊張してもストレスを十分に減少させないことと解釈することが可能であった。



## 第 7 章 結論

### 7.1 本論文で得られた主要な結論

本論文の目的はストレスと疲労に対する耐性に関わる腹側迷走神経の活性化を特定指標で分析し、交代勤務耐性に影響を与える要因を導き出すことである。

(1) このような目的を確認するために重要な次の四つの要素があった。

- ① 交代勤務耐性を評価するためのポリヴェーガル理論である。ポリヴェーガル理論では副交感神経の迷走神経が系統発生的に背側迷走神経と腹側迷走神経に分派し、腹側迷走神経の活動が社会神経系を活性化させて耐性領域を拡大し、ストレスと疲労による損傷を回復するのに影響を及ぼすことが分かった。
- ② 背側迷走神経と腹側迷走神経の解剖学的な分離である。背側迷走神経は迷走神経の背側核 (Dorsal nucleus of vagus) から始まり、腹側迷走神経は疑核 (Nucleus ambiguus) から始まることを確認し、副交感神経系と社会神経系領域が解剖学的にも差別化されていることが確認できた。
- ③ ポリヴェーガル理論での耐性領域の拡張のために腹側迷走神経の活性化が必要だが全体的な迷走神経の緊張度 (Vagal tone) の上昇が腹側迷走神経の活性化<sup>(58)</sup>をもたらすということが分かった。
- ④ 迷走神経緊張強度は pNN50、rMSSD、lnHF などの指標を活用して分析することができた。

(2) ポリヴェーガル理論に対する解剖学的な解析と、この理論に対して定量的な測定の可能性がある腹側迷走神経の活性化に関連がある生体指標を発見した。それを測定できる機器を用いて実際に人間に測定し、理論的な部分を実体的なデータとして証明する試みを行ったことが、この研究の意義といえる。

(3) 測定された全体データを分析した結果、

- ① 測定されたポータラジオでのストレスが一番高い時間帯は 05 時から 09 時で、疲労度が一番高い時間帯は 12 時から 17 時の間だった。
- ② ストレスと疲労度が最も高い業務は情報収集であることが分かった。
- ③ 国際 VHF ラジオ通信では、英語交信が日本語交信よりストレスと疲労度が高かった。
- ④ 見張りの業務はストレスが高いが疲労度は低いことが分かった。
- ⑤ 航空機の騒音がストレスと疲労度の増加に影響を与えることが分かった。
- ⑥ 朝 7 時ごろのラッシュアワーを含めた集中勤務時間帯のストレスや疲労度の数値は高かった。

(4) 本研究で得られた生体データから周波数系列指標と時系列指標の間に有意な相関関係

が発見され、これによりデータ自体の信頼性が確認できた。

また、長時間の測定データから信頼性を確保できる SDNN のような時系列指標を本研究でオペレーターたちを長時間測定することによりデータを比較、活用できたことに意味があった。

しかし、測定データは動かない状態での測定ではなく、勤務に集中する状態で測定したデータなので、測定されたデータが交感神経に偏った結果とならざるを得ず、各指標ごとの絶対的な安定数値とか基準値を確立するよりも、心拍変動性そのものに意味づけして解釈することがさらに意味があることが分かった。オペレーター別に測定期間にも差があり、業務量が一定でないポトラジオの特性上、個人別に測定当時に遂行した業務種類と業務量にも差があった。しかし、このような条件でも有意義な分析が可能な差異を見つけることができた。

(5) オペレーター別に生体データを比較して思えば、1 番オペレーターは、すべての指標で交代勤務耐性の低下を示唆する下位 3 位の中に所属したが、8 番オペレーターは、すべての指標で上位 3 位の中に所属した。

特に 1 番オペレーターは直接的な心拍変動とストレスの抵抗度を示唆する SDNN の指標が 8 番オペレーターの 3 分の 1 以下で最も低く現われて心拍変動性が深刻に低下していることを知ることができた。また、自律神経トーンを示す TP の数値も最も低く、ストレス指数である LF/HF 数値は二番目に高く測定され、慢性的なストレスと疲労を持っていることが確認できた。

ストレスの回復力を表す CCVHF やストレスの反応力を表す CVRR、耐性領域と関連がある迷走神経の緊張強度を表わす lnHF、pNN50、rMSSD でも、最も低い数値が記録され、ストレスの損傷に対する復元力が低いということを確認することができた。一方、8 番オペレーターは TP と SDNN は唯一 100 を超えており、CCVTP、CCVHF、HFnu、lnHF、CVRR、pNN50、rMSSD では 8 人のオペレーターの中から最も高い数値を記録された。

(6) 5 番オペレーターも 15 つの指標のうち、三つの指標を除く残りの指標が上位 3 位に所属した。2 番オペレーターは 5 つの指標を除いた残りの指標が上位 3 位に所属されたが、測定された期間が 5、8 番オペレーターたちに比べてはるかに長かったし、当時に遂行した業務量も多かった。

(7) 結論的に交代勤務耐性が他のオペレーターたちより大きかった人は 2、5、8 番オペレーターだったし、相対的に小さかった人は 1、3、4 番オペレーターだった。

交代勤務耐性が高いオペレーターたちの共通的な特徴は勤務経歴が短く (3-6 年)、年齢が若かった (24-28 歳)。また、その人たちは一週間に 1-2 回ぐらい汗が出るぐらいの運動をした。特に、交代勤務耐性が最も高いと評価される 8 番オペレーターは 2 つの運動をしていた。

そして、表 5.1 のように 2 番オペレーターは喫煙をしていて、2、5、8 番オペレーターすべて飲酒をしていたが、交代勤務耐性で高い結果が出た。これで飲酒よりは運動がもっと大きな影響を与えることが分かる。また、4 番オペレーターは運動をしていたが、耐性が高くないよ

うに出たが、これは勤務経歴や年齢に関連があると考えられる。そして相対的に年齢が高い1、4、7番オペレーターの測定結果ではTPとHFの顕著な減少を見せていることを確認された。3番オペレーターの測定結果は交代勤務耐性が高くないことがわかった。その人は勤務経歴と年齢が相対的に高くなかったが運動をしていないし、飲酒をしていることが要因と考えられる。また、3番オペレーターは続ける日勤をして、長時間勤務の後に長時間の休憩をする交代勤務より日勤のストレスがもっと高いと解釈するのもできるが、本研究で対照することができる他の日勤者がなく、退勤後に行う家庭活動といった個人差が存在するため、日勤が必ず交代勤務よりもストレスが大きいと判断するのはまだ無理である。

6番オペレーターは5番オペレーターのように勤務経歴と年齢が高くなく、飲酒もしなかったが交代勤務耐性が高くないことがわかった。また、7番オペレーターの場合は勤務経歴と年齢が高く、喫煙をしており、1日に4時間未満の睡眠時間を持っていたが、相対的に交代勤務耐性が低くはなかった。6番オペレーターの場合は若いが、運動をしないことに起因すると解釈できる。しかし飲酒をしていないにもかかわらず数値が低いのは個人差と推測される。グラフ分析でも説明したが、6番オペレーターは、基本的な生体指標の形は良く出ているが、全体的なデータから高くない結果が発見された。

7番オペレーターの場合は勤務経歴が長く、年齢も相対的に多かった。また、体格指数が一番高く、喫煙をしていながら運動をしていなかったが飲酒はしていなかった。グラフ分析ではストレス数値が他のオペレーターたちより低く測定され、迷走神経の活動度とストレスに対する反応力を表すCVRR数値と迷走神経の緊張強度を示すrMSSDの数値が高かった。

この喫煙は、本研究に大きな影響を与えないことや、7番オペレーターの唯一肯定的な指標である、禁酒がこのような結果を説明できると思う。ただ、交代勤務耐性において似たような条件でも結果に対する個人間の差が顕著ということも6、7番オペレーターのデータ分析を通じて確認できた。

(8) アンケート結果は生体データの結果と違いが見られた。生体データで交代勤務耐性が最も高かった8番オペレーターのアンケートでは5項目の中で不眠症、睡眠障害、不安に全て該当したが、4番オペレーターの場合は不眠症だけ、7番オペレーターの場合は憂鬱だけ該当された。もちろん、2番オペレーターは該当事項がなかったし、5番オペレーターは不眠症だけで該当されていたように生体データと似たような結果もあった。

追加的に実施した4項目の交代勤務耐性に影響を与えるアンケートでは2、3、8番オペレーターの強靱性が高かった。柔軟性には1、7、8番オペレーターの数値が高かった。しかし、無力感でも6、8番オペレーターの数値が高かった。このような生体データとアンケートの違いは、オペレーターの体が実際に受けるストレスや、疲労とオペレーターが自覚するストレスと疲労の差異があることを示唆する。これはおそらくオフィスの雰囲気や勤務当時の個人的な事情等のように周辺環境の影響を受けるものと考えられる。

(9) 交代勤務耐性と関連して今回の測定では個人別差異が確かに現われ、今回の研究で導き出した交代勤務耐性に影響の主因は勤務経歴と年齢、運動可否、飲酒可否などの順に影響を与えた。De Meersman RE の研究<sup>(60)</sup> (1993) では有酸素運動が心拍変動に役立つという結果が出て、M.A.McNarry と M.J.Lewis の研究<sup>(61)</sup> (2012) では有酸素運動より年が心拍変動にもっと大きな影響を与えるという結果が出た。これで、運動も明らかに交代勤務耐性の向上に役立つが、年齢と勤務経歴がより大きな影響を与えるという本研究結果と一致することが確認できる。

本研究で得られたデータを総合すると、交代勤務耐性が相対的に高い人は勤務経歴が短く年齢が若かった。飲酒の有無は運動をするなら大きな影響を与えなかった。そのため、長期間の交代勤務自体が交代勤務耐性に大きな影響を与えることがわかる。また、長期勤務者である 1、4、7 番オペレーターのアンケート結果で柔軟性が非常に減少されていることを確認できるが、これは生体リズムが正常ではないというものと解釈できる。

結論的にどんな方式でも正常な日勤ではない夜間勤務を含めた長期間の交代勤務はどのような方式でもオペレーターの交感神経のバランスに影響を与えており、本研究で推定できる変数としては勤務経歴と年齢、運動可否、飲酒などが導き出された。日勤と交代勤務の比較、喫煙が交代勤務耐性に与える影響は、データの不足で確認できなかった。

## 7.2 提言

(1) 本研究の結果による提案は、長期交代勤務者の生体リズムの回復のための日勤を行う必要があるという考え方である。もちろん一定期間の日勤が 3 番オペレーターのようにむしろ否定的な結果が導き出される可能性もあるので、そのような施行をする前は日勤の勤務者らに対する追加的な研究が先行される必要がある。また、飲酒に関連して過剰な飲酒は当然勤務に悪影響を与えるだろうが、禁酒をすることが必ず良い影響とは考えにくいので、適当な飲酒の影響を相殺させる適切で規則正しい運動の奨励が必要と考えられる。また、航空機の騒音を減らすための対策も必要であり、2 つ以上の勤務を同時にしないようにする対策も必要である。そして、休憩時間は夜 12 時以降に割り当てることが交代勤務に役立つと考えられる。

(2) 本研究では様々な生体データを活用した分析を実施したが、生体指標として定かではない部分も存在する。まず、LF/HF の割合が心臓の自律神経のバランスに対する正確な測定ではないという主張もある。HF ピークは心臓副交感神経活動を反映すると広く信じられ、LF はもっと複雑ではあるが支配的な交感要素を持っていると仮定しているが、LF/HF 比率を使って健康と疾病に関して交感神経の活動を定量化することが無理であり、このような仮定が適用されない事例も多いという論文も存在する<sup>(64)</sup>。

しかし、LF/HF 比率が疾病や疾病に関する診断において直接的な根拠資料としての価値は低いかもしれないが、今回の研究のように長期間の大まかな心的負荷に係る交感神経の変化の分析においては、確かに参考的な役割としての価値があると考えられる。その理由は、今回の研究で測定された 8 人の心拍変動に関する否定的/肯定的な個人別の違いが明らかに見つかり、

心拍変動による個人別の違いが LF/HF の違いとほぼ合致したからである。例えば、交代勤務耐性が低いと思われる人々(3 人)の心臓拍動の変動性(HRV)を示唆する指標は低く示された反面(下位 3 人に含まれた 3 人)、その 3 人の LF/HF の数値は相対的に高く(HRV 下位 3 人が LF/HF の上位 3 位に全て含まれる)測定された。もちろん、肯定的な反応については差異が発生したが、概ね今回の研究では HRV と LF/HF の結果として一致した解析が可能であった。今後研究を続けるべき事項であるが、細部的、直接的としての LF/HF 比率としてではなく、長期間のデータを用いた参考的かつ全体的な分析データとしての価値は明らかに存在すると考える。

(3) 本研究ではストレス数値は低い、心拍数は高い状態をポリヴェーガル理論における最適な覚醒領域である耐性領域と仮定して解析した。そしてその仮定の証明のため腹側迷走神経の活性度を示唆する pNN50 と rMSSD の数値と耐性領域の比較を実施した。その結果、相互にある程度の相関関係が存在することが分かった。こうした仮定が正しければ心拍数は高く、SNS 数値は低くかつ pNN50、rMSSD の数値が高い時勤務に最適化された状態だと分析することができる。しかし、相関関係の高い人と低い人が存在した。概ね交代勤務耐性の高い人と真夜中以降の休憩を取った人の相関関係が高かった。また、真夜中以降の休憩を取ったオペレーターの耐性領域の拡大を発見することができた。しかし、それを定量的に分析することは困難であった。データが単に 8 人のオペレーターのものしかないこともあるが、相関関係の高いオペレーターも定量化できるほどの比例性は見られなかった。相互間の有意義な相関関係を把握するには追加的な研究が必要である。

(4) そして時系列分析の予不可能性を定量化して分析することができる非線形測定法(Non-linear measures, S, SD1, SD2, SD1/SD2, ApEn, SampEn, DFA  $\alpha$ 1, DFA  $\alpha$ 2, D2 など)を活用すればより詳細で正確な分析が可能であると考え、このような分析データが累積すると、未だに定量的に分析が難しいストレスと疲労の分析において、より意味のある解析やより正確に分析できる新しい測定方法を求めるのに役立つと考えられる<sup>(14)</sup>。

(5) また、例示したとおり看護師を測定した Seo, Yeon-ok と Kim, Souk Young の研究<sup>(34)</sup>(2016) 結果は、朝型人間が原子力発電所の勤務者を測定した Masaya TAKAHASHI の研究<sup>(67)</sup>(2005) では、夜型人間が交代勤務の適応度が高いという結果が出た。そして朝型人間と夜型人間の中でどちらが交代勤務耐性に役立つかはまだ意見が分かれる状況である。これは勤務の形態ごとに朝型人間や夜型人間の中で交代勤務耐性や適応度に与える影響が異なることがあることを示唆する。今後の研究では、様々な種類の交代勤務形態を分析し、朝型人間と夜型人間の中でどちらが当該勤務形態に交代勤務耐性と適応度が高いかを研究することも意味があると考えられる。3 番勤務者の場合のように日勤者のストレスの数値が高いことと関連して追加的な研究では日勤者と交代勤務者の間の比較を通じてどの勤務方式がより効率的か、二つの体制の中でもっと適した働き方を持つ勤務者の特性はどんなものかを把握する研究も必要と考えられる。

## 謝辞

論文に対する方向を定め、完成まで研究の細部に亘りご指導と激励をしてくださった東京海洋大学、海事システム工学部門、竹本孝弘教授に心より感謝の意を表します。

東京海洋大学、海事システム工学部門、逸見真教授、村井康二教授には足りない論文ですが本論文をご精読いただき、有用なコメントを頂きました。感謝の意を表します。

村井康二教授はポータラジオでの生体情報測定に関する有用な経験と情報を教えていただきました。心より感謝いたします。

東洋信号通信社の小島信吾社長の積極的な協力がなかったら研究が成立しませんでした。快く測定に協力してくださって支援を惜しめない社長に感謝の意を表します。

この研究で全ての協力者から有意義な測定データが得られたことは、ポータラジオの三浦弘之さん、栗岡由香さん、その他の船舶情報オペレーターのご協力の賜りです。皆さんに感謝を申し上げます。

平成 30 年 4 月に竹本研究室へ配属となり、研究室の学生の皆様には、多く激励を頂きました。心より感謝いたします。

この論文のための研究に支援してくださった皆さんと今も休まずご苦勞していらっしゃる港湾関係者の皆さんにこの論文を奉げます。

## 引用・参考文献

- (1) Hans Selye: A Syndrome produced by Diverse Nocuous Agents, Nature 138, pp.32, 1936 Jul
- (2) 大学病院医療情報ネットワーク (University Hospital Medical Information Network, UMIN):  
<http://plaza.umin.ac.jp/~beehappy/analgesia/react-stress.html>, 2019
- (3) Mark F. Bear, Barry W. Connors, Michael A. Paradiso: Neuroscience-Exploring the brain Lippincott Williams & Wilkins 3rd ed., 2007
- (4) Guidance on work-related stress Spice of life or kiss of death?, European Commission Directorate-General for Employment and Social Affairs Unit D.6, 2000
- (5) 大須賀 美恵子, 寺下裕美, 下野太海: 自律系生理指標を用いたメンタルワークロードの評価に向けて, 計測自動制御学会論文集 29(8), pp.979-986, 1993
- (6) S. Kum, M. Furusho, O. Duru: Mental Workload of the VTS Operators by Utilising Heart Rate, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 1(2), pp.145-151, 2007
- (7) 日本工業規格: 人間工学-精神的作業負荷に関する原則-用語及び定義, JIS Z 8502, 1994
- (8) Ross Owen Phillips: What is fatigue and how does it affect the safety performance of human transport operators?, Institute of Transport Economics Norwegian Centre for Transport Research, Fatigue in Transport Report I, 2014 Oct
- (9) 日本大百科全書(ニッポニカ), 小学館
- (10) John A. M. Chitty: Dancing with Yin and Yang-Chapter 6 The Autonomic Nervous System, pp.118-151, 2013
- (11) 臨床検査 52 441, 2008
- (12) Hans Selye: Stress and the General adaptation syndrome, British medical journal, pp.1383-1392, 1950 Jun
- (13) Roderic Gray : Workplace Stress-A review of the literature, pp.4, 1998
- (14) Fred Shaffer and J. P. Ginsberg: An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms, Frontiers in Public Health Vol.5, Article 258, 2017 Sep
- (15) みやけ内科の家庭の医学家庭の医学心電図の波形のでき方イラスト 1:  
[https://www.miyake-naika.or.jp/05\\_health/shindenzu/shindenzu\\_01.html](https://www.miyake-naika.or.jp/05_health/shindenzu/shindenzu_01.html)
- (16) 富田 豊: 心拍の計測, 人間工学 52(1), 特集 3-人間工学のための計測手法 第4部: 生体電気現象その他の計測と解析(4), pp.1-5, 2016
- (17) Kenneth C. Bilchick, Ronald D. Berger: Heart Rate Variability, Journal of Cardiovascular Electrophysiology 17(6), pp.691-694, 2006 June
- (18) Ki-Jong Park, Heejeong Jeong: Assessing Methods of Heart Rate Variability, Korean J Clin Neurophysiol, 16(2), pp.49-54, 2014 Dec
- (19) Epomedicine, Cardiac Cycle – Summary and Wigger’s Diagram:  
<https://epomedicine.com/medical-students/cardiac-cycle-summary-wiggers-diagram/>

- (20) Boston Scientific, 心臓自体のペースメーカー: <https://www.bostonscientific.com/jp-JP/health-conditions/icd/icd-02.html>
- (21) Tae-Kyeong Lee: Autonomic nervous system on cardiovascular control, 大韓神経科学会(Korean Neurological Association) 第 36 回目秋季学術大会, 2017
- (22) Byung-Moon Choi, Gyu-Jeong Noh: 心拍変異度(Heart Rate Variability, HRV), 静脈麻酔 (Intravenous Anesthesia, 学会誌) 8(2), pp.45-86, 2004
- (23) Lewis A. Lipsitz, Junichiro Hayano, Seiichiro Sakata : Complex demodulation of cardiorespiratory dynamics preceding vasovagal syncope, *Circulation*. 98(10), pp.977-983, 1998 Sep
- (24) Anatomi Fisiologi Sistem Kardiovaskuler: <https://www.slideshare.net/PrastutiMubarak/anatomi-fisiologi-kardiovaskuler>, 2019 Nov
- (25) 麻酔科学(Anesthesia and pain management, 韓国語)の該当部分を著者が翻訳, Korean Society of Anesthesiologists, 2009
- (26) 下地 伸司, 小田中 瞳, 宮田 一生: 歯科治療の影響を解析するための心拍変動を用いた自律神経活動モニターシステムの開発, 北海道歯学雑誌 34(1), pp.23-27, 2013 Sep
- (27) 森谷 敏夫: 自律神経機能と運動, Japanese Society of Psychosomatic Obstetrics and Gynecology 19(3), pp.271-277, 平成 27 年 3 月
- (28) 株式会社疲労科学研究所: <http://www.fatigue.co.jp/pdf/KK-test01.pdf>, 2019 Nov
- (29) Vitalscan: [http://www.vitalscan.kr/dt\\_hrv1\\_kr.htm](http://www.vitalscan.kr/dt_hrv1_kr.htm), 2019 Nov (韓国語)
- (30) Kim Kopenhaver Doheny, R. Alberto Travagli, Kirsteen N. Browning: Diminished Vagal Tone is a Predictive Biomarker of Necrotizing Enterocolitis-risk in Preterm Infants, *Neurogastroenterol Motil* 26(6), pp.832-840, 2014 June
- (31) Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart rate variability-Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use(Guidelines), *European Heart Journal* 17, pp.354-381, 1996 Mar
- (32) 平柳 要, 岩崎賢一, 神田省吾: メンタルワークロード(MWL)の測定・評価法に関する実験的検討, 人間工学 32(5), pp.251-259, 1996
- (33) Atanu Kumar Pati, Arti Chandrawanshi, Alain Reinberg: Shift work: Consequences and management, *Current Science* 81(1) (Review Article), pp.32-52, 2001 July
- (34) Seo, Yeon-ok, Kim, Souk Young: Influencing Factors on the Nurse's Shiftwork Tolerance, *Korean Journal of Occupational Health Nursing* 25(4), pp.373-383, 2016 Nov
- (35) Härmä M., Sallinen M., Ranta R.: The effect of an irregular shift system on sleepiness at work in train drivers and railway traffic controllers, *Journal of Sleep Research* 11, pp.141-151, 2002
- (36) H. Stefan Bracha: Freeze, Flight, Fight, Fright, Faint-Adaptationist Perspectives on the Acute Stress Response Spectrum(Review Article), *CNS Spectrums* 9(9), pp.679-685, 2004 Sep
- (37) BESSELA. VAN DER KOLK : Clinical Implications of Neuroscience Research in PTSD, New York Academy of Sciences, 2006



- (38) Giri Maruta: ポリヴェーガル理論, 人間にとって安全とは何か,  
<http://www.banyantree8.com/blog/2013/12/title-715942.html>, 2019 Nov
- (39) シルズ、フランクリン(森川ひろみ訳): クラニオセイクラル・バイオダイナミクス II,  
 エンタプライズ出版部 東京, pp.334-335, 2006
- (40) Stephen W. Porges: The polyvagal theory-New insights into adaptive reactions of the autonomic nervous system, *Cleve Clin J Med* 76, Suppl 2, 2009 Apr
- (41) オグデン, パット他(訳日本ハコミ研究所): ト라우マと身体, 星和書房, pp.36-42, 2012
- (42) Polyvagal theory: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvagal\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvagal_theory), 2019 Nov
- (43) Brandon Hage, Briana Britton, David Daniels, Keri Heilman, Stephen W. Porges & Angelos Halaris: Low cardiac vagal tone index by heart rate variability differentiates bipolar from major depression, *The World Journal of Biological Psychiatry*, pp.1-9, 2017 Sep
- (44) Saksvik-Lehouillier I., Pallesen S., Bjorvatn B.: Towards a more comprehensive definition of shift work tolerance, *Industrial Health*, 53(1), pp.69-77, 2015
- (45) Natvik, S., Bjorvatn, B., Moen, B. E.: Personality factors related to shift work tolerance in two-and three-shift workers, *Applied Ergonomics*, 42(5), pp.719-724, 2011
- (46) Igor Kardum, Jasna Hudek-Knežević, Nada Krapić: The Structure of Hardiness, its Measurement Invariance across Gender and Relationships with Personality Traits and Mental Health Outcomes, *Psychological Topics* 21(3), pp.487-507, 2012
- (47) 松下昌之介: 心拍変動解析を用いた視覚障害と理学療法臨床実習のストレス評価, 筑波技術大学テクノレポート 21(2), pp.56-60, 2014 Mar
- (48) 株式会社トライテック: <https://www.trytech.co.jp/checkmyheart/glossary.html>, 2019 Nov
- (49) 吉田たかよし, 板生研一, 地村未知弘: あがり症治療を目的とした自律神経活動の評価指標の開発, WIN フロンティア株式会社  
[https://www.winfrontier.com/sub/article/document\\_0621.pdf](https://www.winfrontier.com/sub/article/document_0621.pdf)
- (50) 早野順一郎, 山田眞己: 心拍変動と自律神経機能, *生物物理* 28(4), pp.198-202, 1988
- (51) 寺尾 保, 両角 速: 高地ウォーキング「嬭恋村を歩こう」における自律神経系 および末梢血液循環に及ぼす影響, *東海大学スポーツ医科学雑誌* 第 26 号, pp.69-78, 2014
- (52) 相場繁様, 石井苗子様: 第 2 回臨床自律神経機能 Forum 抄録-地域における自律神経機能評価の実践(特定非営利活動法人日本臨床研究支援ユニット),  
<http://forum.crosswell.jp/scientific/3892/>, 2017 年 12 月
- (53) 両角 速, 山下泰裕, 寺尾 保: 箱根駅伝選手における自律神経活動と競技成績に関する実践的研究, *東海大学スポーツ医科学雑誌* 第 26 号, pp.53-58, 2014
- (54) 科学技術振興機構(JST 新技術説明会):  
[https://shingi.jst.go.jp/var/rev0/0000/6629/2017\\_igakubu\\_7.pdf](https://shingi.jst.go.jp/var/rev0/0000/6629/2017_igakubu_7.pdf), 2019 Nov
- (55) Luciana A. Campos, Valter L. Pereira Jr, Amita Muralikrishna: Mathematical biomarkers for the autonomic regulation of cardiovascular system, *Frontiers in Physiology-Integrative Physiology* 4 (Review Article), (279), 2013 Oct

- (56)柳原 延章, 石 明寛, 後藤 幸生: レーダーチャート式自律神経バランス解析の女性更年期障害患者への応用-心拍変動解析値によるバランスと歪み・レーダーチャート式評価法, JUOEH(産業医科大学雑誌)36(3), pp.171-177, 2014
- (57)田島 多恵子: 実践研究-知的障害者の運動中の自律神経活動, 平成 30 年度健康・体力づくり事業財団研究助成, pp. 24-35, 平成 30 年
- (58)Stephen W. Porges: The polyvagal theory-phylogenetic substrates of a social nervous system, International Journal of Psychophysiology 42, pp.123-146, 2001
- (59)Koenig J, Thayer JF.: Sex differences in healthy human heart rate variability-a meta-analysis, Neurosci Biobehav Rev 64, pp.288-310, 2016
- (60)De Meersman RE.: Heart rate variability and aerobic fitness, Am Heart J 125(3), pp. 726-731, 1993 Mar
- (61)M. A. McNarry, M. J. Lewis: Interaction between age and aerobic fitness in determining heart rate dynamics, Physiological Measurement 33, pp.901-914, 2012 May
- (62)A.E. Aubert, B. Seps, F. Beckers: Heart rate variability in athletes, Sports Medicine 33(12), pp.889-919, 2003 Feb
- (63)Berkoff DJ, Cairns CB, Sanchez LD, Moorman CT: Heart rate variability in elite American track-and-field athletes. J Strength Cond Res 21, pp.227-31, 2007
- (64)George E. Billman: The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance, Frontiers in Physiology 4, Article26, 2013 Feb
- (65)公益社団法人 東京湾海難防止協会: 新しい交通情報調査システムを利用した東京湾における航行安全調査研究報告書, pp.19, 平成 24 年 3 月
- (66)TDK IoT システムズビジネスユニット Silmee™ シリーズ Bar type Lite 説明資料, 2016
- (67)Masaya TAKAHASHI, Takeshi TANIGAWA, Naoko TACHIBANA: Modifying Effects of Perceived Adaptation to Shift Work on Health, Wellbeing, and Alertness on the Job among Nuclear Power Plant Operators, Industrial Health 43, pp.171-178, 2005
- (68)花澤 寿: 多重迷走神経理論による神経性過食症理解の可能性について, 千葉大学教育学部研究紀要 第 65 巻, pp.349-354, 2017
- (69)武藤 弘: 胃潰瘍の経過と胃液分泌-III.迷走神経の役割, 日本消化器病学会雑誌 第 74 巻 第 5 号, pp.576-580, 1977

#### その他の参考文献

ISO 6385: Ergonomics principles in the design of work systems, 2016

ISO 10075-1: Ergonomic principles related to mental workload-Part 1: General issues and concepts, terms and definitions, 2017

ISO 26800: Ergonomics-General approach, principles and concepts, 2011